



**Universidade de
Aveiro**

2013

Departamento de Engenharia Mecânica

**Tiago Henrique
Ferreira
Teles**

**Estudo do Projecto/Fabrico de Espigões Dentários
em Titânio**



**Universidade de
Aveiro**

2013

Departamento de Engenharia Mecânica

**Tiago Henrique
Ferreira
Teles**

Estudo do Projecto/Fabrico de Espigões Dentários em Titânio

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor João Paulo Davim da Silva, Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais, Joaquim Teles e Maria da Graça Teles, pelo incansável esforço e apoio demonstrado para que eu pudesse acabar o curso.

o júri

presidente

Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

arguente principal

Prof. Doutor Carlos Alberto da Conceição António
Professor Associado com Agregação da Universidade do Porto

orientador

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor Doutor João Paulo Davim pela disponibilidade e apoio prestado ao longo deste trabalho.

Deixo também uma palavra de apreço ao Mestre António Festas, pela grande ajuda prestada nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Uma palavra de gratidão à empresa TiFast® (Itália), nomeadamente ao Departamento de Vendas e Tecnologia, pela cortesia na oferta do material. Um agradecimento especial ao Sr. Engenheiro Marco Costanzi e ao Sr. Engenheiro Yves Invernizzi, pela disponibilidade e atenção dada.

Agradeço de uma forma especial a toda a minha família, louvando pais e irmão, pelo apoio dado ao longo destes anos para que eu pudesse acabar esta fase da minha vida.

Um grande agradecimento a todos os meus amigos, que de uma forma direta ou indireta contribuíram com esclarecimento e motivação. A todos eles, um muito obrigado.

Um agradecimento especial ao Manuel Castelhana pela ajuda prestada.

palavras-chave

Espigão Dentário; Tratamento Endodôntico; Titânio; Microtorneamento.

resumo

O presente trabalho compreende um estudo sobre o fabrico personalizado de espigões dentários em titânio pelo processo de microtorneamento.

A rugosidade do espigão é um fator importante e a ter em conta na qualidade superficial e no bom desempenho deste, para que se consiga uma fixação segura à dentina e ao cimento de fixação.

Para este efeito estudou-se a possibilidade de se realizar microtorneamento de precisão num torno CNC convencional. Analisou-se a influência dos parâmetros de corte, como a profundidade de corte e a velocidade de avanço no efeito da rugosidade superficial e da conicidade nos espigões maquinados.

Em termos de resultados foi demonstrado que é possível o fabrico de espigões dentários com rugosidades diferentes, consoante a variação dos parâmetros de corte.

Por fim, foram comparadas as características dos espigões maquinados às características do um espigão comercial.

keywords

Dental Post; Endodontic Treatment; Titanium; Micro-turning.

abstract

The present work includes a study of the manufacture custom dental posts on titanium through micro turning process.

The surface roughness of the dental posts is an important factor to take on account in surface quality and in the good performance of these, in order to achieve a secure fixation in the root dentin and in the cement.

For this purpose it was studied the possibility of performing precision micro turning of a conventional CNC lathe. It was analyzed the influence of cutting parameters, such as depth of cut and the feed rate on the effect of the surface roughness and of the conicity machined dental posts.

In terms of results it was demonstrated that it is possible to produce dental posts with different surface roughness, according to the cutting parameters.

Finally, the characteristics of the machined dental posts were compared to the characteristics of a commercial post.

Índice

I. Lista de Figuras	iii
II. Lista de Tabelas	vii
III. Nomenclatura	ix
1. Introdução	1
1.1 Endodontia	2
1.2 Microtorneamento	3
1.3 Objetivo deste Estudo	5
1.4 Estrutura da Presente Dissertação	6
2. Revisão Bibliográfica	9
2.1 Endodontia	9
2.1.1 O que é um espigão dentário?	10
2.1.2 Comprimento do remanescente da raiz/ comprimento do espigão	12
2.1.3 Diâmetro do espigão	13
2.1.4 Design do espigão	14
2.1.5 Material do espigão	15
2.1.6 Efeito de Férula	17
2.1.7 Tipo de cimento de fixação	17
2.1.8 Tipo de material para o núcleo coronário	18
2.2 Microtorneamento	19
2.2.1 Forças de maquinagem	20
2.2.1.1 Efeito da profundidade de corte	21
2.2.1.2 Efeito da velocidade de avanço e velocidade de rotação	23
2.2.1.3 Análise das aparas	23
2.2.2 Efeito dos parâmetros de corte na rugosidade superficial	24
2.3 Síntese	25
3. Metodologia Experimental	27
3.1 Material Utilizado	27
3.2 Desenho do Espigão a Maquinar	28
3.3 Torno CNC	28
3.4 Ferramentas de Corte	30
3.5 Parâmetros de Corte	31
3.5.1 Velocidade de corte	31
3.5.2 Velocidade de avanço	32
3.5.3 Profundida de corte	33

3.6	Estratégia de Maquinagem	33
3.7	Caracterização das Superfícies Maquinadas.....	36
3.7.1	Rugosímetro	36
3.7.2	Análise microscópica	37
4.	Resultados e Discussão.....	41
4.1	Avaliação dos Parâmetros de Maquinagem	41
4.1.1	Rugosidade média aritmética (Ra).....	41
4.1.2	Amplitude da rugosidade (Rt).....	42
4.1.3	Outros parâmetros de rugosidades.....	44
4.1.4	Aspeto e perfil de rugosidade.....	45
4.1.5	Taxa de produção.....	48
4.1.6	Grau de tolerância IT	49
4.1.7	Classificação da melhor rugosidade média aritmética / IT	52
4.2	Análise da Forma Geométrica	52
4.2.1	Classificação da melhor qualidade dimensional.	56
4.3	Tempo de maquinagem.....	57
4.3.1	Classificação de melhor tempo	61
4.4	Comparação Entre os Espigões Maquinados e o Espigão Comercial (Dentoclic®).....	62
4.5	Exemplos de Escolhas de Espigões Personalizados	64
4.5.1	Primeiro exemplo.....	64
4.5.2	Segundo exemplo.....	66
4.5.3	Terceiro exemplo.....	67
5.	Conclusões	69
5.1	Proposta de Trabalhos Futuros.....	70
6.	Referências	71
7.	Anexos.....	77

I. Lista de Figuras

Figura 1.1 Espigão radicular em titânio CP (4:1), de forma cilíndrico-cônica (Dentoclic®).....	1
Figura 1.2 Constituição de um dente natural e de um dente tratado (Castro, et al., 2003).	2
Figura 1.3 Fatores necessários para a micromaquinagem (Rahman, et al., 2010).....	4
Figura 1.4 Espigão comercial (esquerda) e um dos espigões maquinados (direita), comparados a um porta-minas de 0,7mm e a uma moeda de um cêntimo.	6
Figura 2.1 Dente molar e espigão de níquel-titânio.....	11
Figura 2.2 Espessura mínima da guta-percha (Castro, et al., 2003).	12
Figura 2.3 Diâmetro do espigão (Castro, et al., 2003).....	13
Figura 2.4 Espessura do colar de metal para o efeito de férula (Castro, et al., 2003).	17
Figura 2.5 Dimensões para a micromaquinagem (Chae, et al., 2006).....	19
Figura 2.6 Deflexão de uma peça num processo de torneamento (Azizur Rahman, et al., 2005).....	21
Figura 2.7 Forma da apara, ISO 3685 (Davim et al., 2006).....	24
Figura 3.1 Barra de Titânio CP Grau 2 com 10mm de diâmetro e 500mm de comprimento.....	28
Figura 3.2 Torno CNC usado na maquinagem dos espigões.....	29
Figura 3.3 Bucha e torreta do torno.	29
Figura 3.4 Ferramenta rômbica utilizada na maquinagem.	30
Figura 3.5 Porta-ferramentas SDJCL 2020K11.....	31
Figura 3.6 Velocidade de corte usadas na maquinagem.....	32
Figura 3.7 Relação l/d.....	34
Figura 3.8 Primeira parte da maquinagem do espigão, desbaste do cone.	34

Figura 3.9 Segunda parte da maquinagem, desbaste do corpo.	35
Figura 3.10 Terceira parte da maquinagem, desbaste final.....	35
Figura 3.11 Rugosímetro Hommel Tester T1000 E.....	36
Figura 3.12 Pontos de medição da rugosidade.	37
Figura 3.13 Mitutoyo TM com 30X de ampliação.	38
Figura 3.14 Microscópio ótico Nikon Eclipse Lv 150.	38
Figura 3.15 Medições para o estudo do efeito de conicidade nos espigões maquinados.	39
Figura 4.1 Rugosidade média aritmética em função do avanço e da profundidade de corte.	42
Figura 4.2 Amplitude da rugosidade em função do avanço e da profundidade de corte.	43
Figura 4.3 a) Perfil de rugosidade e b) aspeto superficial, do espigão comercial.	45
Figura 4.4 Perfis de rugosidades de três espigões dentários.	46
Figura 4.5 Aspeto superficial de todos os espigões maquinados.	47
Figura 4.6 Relação entre Ra e Tp.	49
Figura 4.7 Relação entre IT e velocidade de avanço.	51
Figura 4.8 Representação da possível conicidade dos espigões.	53
Figura 4.9 Medidas dos diâmetros dos espigões para uma profundidade de corte de 80µm.	53
Figura 4.10 Medidas dos diâmetros dos espigões para uma profundidade de corte de 40µm.	54
Figura 4.11 Medidas dos diâmetros dos espigões para uma profundidade de corte de 20µm.	54
Figura 4.12 Representação do ângulo β	55
Figura 4.13 Relação entre o tempo de maquinagem e o ângulo β , para P=80µm.....	58

Figura 4.14 Relação entre o tempo de maquinagem e o ângulo β , para $P=40\mu\text{m}$	58
Figura 4.15 Relação entre o tempo de maquinagem e o ângulo β , para $P=20\mu\text{m}$	59
Figura 4.16 Relação entre o tempo de maquinagem e R_a , para $P=80\mu\text{m}$	60
Figura 4.17 Relação entre o tempo de maquinagem e R_a , para $P=40\mu\text{m}$	60
Figura 4.18 Relação entre o tempo de maquinagem e R_a , para $P=20\mu\text{m}$	61
Figura 4.19 Conjunto dos doze espigões maquinados.....	63

II. Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de algumas partes constituintes de um dente.	2
Tabela 2.1 Comparação de algumas propriedades dos materiais usados em espigões dentários (Andrea, et al., 2009).....	16
Tabela 3.1 Características químicas e mecânicas do titânio Grau 2.	27
Tabela 3.2 Forma e características da ferramenta usada.	30
Tabela 3.3 Velocidades de avanço usadas.....	32
Tabela 3.4 Profundidades de cortes usadas.	33
Tabela 3.5 Rugosidades e sua descrição.	37
Tabela 4.1 Valores de todas as rugosidades medidas em cada espigão.	44
Tabela 4.2 Valores das rugosidades medidas no espigão comercial.	45
Tabela 4.3 Valores da taxa de produção da maquinagem.	48
Tabela 4.4 Valores de IT normalizados.....	50
Tabela 4.5 IT normalizado de cada espigão.	50
Tabela 4.6 Classificação dos melhores valores de Ra / IT dos espigões maquinados.	52
Tabela 4.7 Cálculo do ângulo β	56
Tabela 4.8 Classificação dos espigões segundo a melhor qualidade dimensional obtida.....	56
Tabela 4.9 Tempos de maquinagem de todos os espigões.	57
Tabela 4.10 Classificação dos espigões segundo o tempo mais rápido de maquinagem.....	62
Tabela 4.11 Valores de Ra dos espigões maquinados que mais se aproximam do valor de Ra do espigão comercial.....	62

Tabela 4.12 Valores β dos espigões maquinados que mais se aproximam do valor β do espigão comercial.	63
Tabela 4.13 Valores das constantes para o primeiro exemplo.	65
Tabela 4.14 Cálculo do fator (f) para o primeiro exemplo.....	65
Tabela 4.15 Valores das constantes para o segundo exemplo.	66
Tabela 4.16 Cálculo do fator (f) para o segundo exemplo.	66
Tabela 4.17 Valores das constantes para o terceiro exemplo.	67
Tabela 4.18 Cálculo do fator (f) para o terceiro exemplo.....	67

III. Nomenclatura

Para uma fácil consulta do documento à posteriori, apresenta-se de seguida, a simbologia e abreviaturas utilizadas, bem como o seu significado.

Simbologia/Abreviaturas

μm	Micrometro
$\mu\text{m}/\text{min}$	Micrometro por minuto
$\mu\text{m}/\text{rot}$	Micrometro por rotação
a	Velocidade de avanço
at	Velocidade de avanço em milímetro por minuto
cm^3/min	Centímetro cúbico por minuto
E	Módulo de elasticidade
GPa	GigaPascal
Lt	Comprimento de corte percorrido
m/min	Metro por minuto
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
MPa	MegaPascal
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
P	Profundidade de corte
R	Coeficiente de correlação
R^2	Coeficiente de determinação
Rpm	Rotações por minuto

S	Secção da apara
T	Tempo de maquinagem
TAV	Titânio-Alumínio-Vanádio
Tc	Tempo de corte teórico
Titânio CP	Titânio comercialmente puro
Tp	Taxa de produção
Vc	Velocidade de corte
d	Diâmetro
l	Comprimento
ν	Coeficiente de Poisson
CNC	Controlo numérico computadorizado
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
MEMs	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
UA	Universidade de Aveiro

1. Introdução

O titânio embora seja um elemento abundante em minerais não é encontrado com significância no corpo humano. Até à atualidade, a sua superfície é das mais biocompatíveis conhecida, mostrando tal sucesso em vários dispositivos biomédicos implantados no nosso corpo, incluindo implantes dentários e ortopédicos (Brunette, et al., 2001).

Nos últimos 20 anos, a substituição de dentes por falta de material dentário por próteses tornou-se um tratamento amplamente aceite em odontologia para a reabilitação total ou parcial destes. Hoje em dia o titânio CP tornou-se o material de escolha para implantes dentários. Entre estes existem vários tipos, com várias formas e características (Brunette, et al., 2001). Para este trabalho foi escolhido um espigão liso, com forma cilíndrica e cónica na ponta (Figura 1.1).

Uma das características que contribui para a seleção do espigão da Figura 1.1 é a excelente biocompatibilidade do titânio, uma vez que este tem uma boa resistência à corrosão, tornando-o assim quase inerte a ataques eletroquímicos provenientes da gengiva e da saliva no ambiente oral (Mahmound, et al., 2010).



Figura 1.1 Espigão radicular em titânio CP (4:1), de forma cilíndrico-cónica (Dentoclic®).

1.1 Endodontia

Endodontia é a especialidade da odontologia responsável pelo estudo da polpa dentária e de todo o sistema de canais radiculares, bem como das doenças que os afeta (Leonardo, 2006).

Atualmente a restauração de dentes com tratamento endodôntico é cada vez mais um problema que requer por parte do médico dentista um conhecimento das diferentes técnicas, que possibilitam os melhores resultados possíveis. Uma das técnicas é a utilização de espigões radiculares (Silva, et al., 2006).

Para uma melhor compreensão de alguns termos técnicos, a Figura 1.2 mostra a constituição de um dente tratado e de um dente natural e a Tabela 1.1 algumas características mecânicas das partes que constituem o dente.

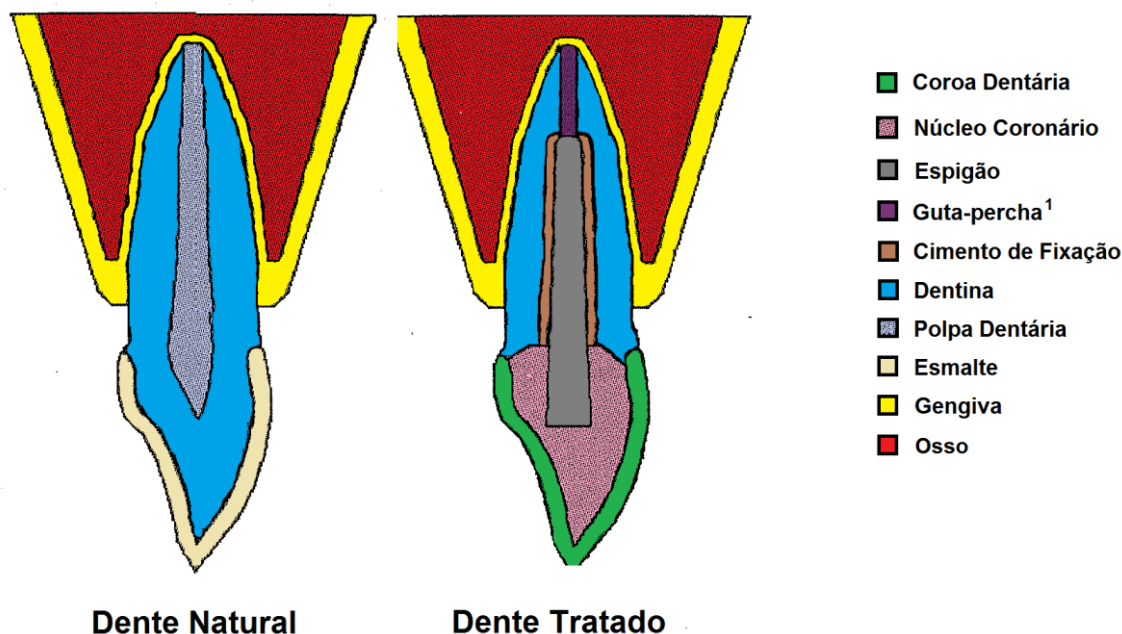


Figura 1.2 Constituição de um dente natural e de um dente tratado (Castro, et al., 2003).

Tabela 1.1 Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de algumas partes constituintes de um dente.

Material	E [GPa]	ν
Guta-percha	0,00069	0,45
Dentina	18,6	0,31
Polpa Dentária	0,02	0,45
Esmalte	41	0,30

¹Guta-percha é uma substância vegetal obtida a partir do látex e do Palaquium (Borracha Natural).
Informação retirada do sítio <http://www.brasilecola.com/odontologia/gutapercha> a 01 de Fevereiro de 2013.

A principal razão para a utilização de um espigão dentário é reter o núcleo com o objetivo de restaurar e reforçar a estrutura do dente. Para se obter o melhor resultado, o material do espigão usado para restaurar dentes endodonticamente tratados, deve ter propriedades físicas e mecânicas semelhantes à da dentina, deve ser capaz de se ligar à estrutura do dente e ser biocompatível no ambiente oral (Plotino, et al., 2007).

Espigões dentários são obrigados a manter as suas propriedades no ambiente da cavidade oral, pois estando em contato direto com a saliva são sujeitos a deterioração através da absorção da água, alterações de pH e degradação enzimática. Devem também resistir a cargas cíclicas e a variações térmicas induzidas por alterações da temperatura oral (Stewardson, et al., 2010).

Dentes tratados endodonticamente apresentam respostas diferentes do que os dentes intactos, principalmente na sua resistência. A remoção da polpa e da dentina radicular diminui o mecanismo de proteção e reduz a capacidade do dente suportar a determinadas tensões/deformações, o que compromete a resistência à rotura da raiz. Um espigão intra-radicular é uma opção restauradora, que fornece retenção ao núcleo e à cora. Para se garantir uma boa estabilidade no dente é preciso ter-se em conta vários fatores, tais como o comprimento, o diâmetro, o material e a rugosidade do espigão (Chi-Wei Ni, et al., 2011).

No entanto, um dente tratado endodonticamente deve ter um bom prognóstico, ser capaz de retomar a função plena e satisfatoriamente servir como um pilar para uma prótese fixa ou parcialmente removível (Michael, et al., 2010).

Neste âmbito, é importante conhecer o processo pelo qual é produzido/fabricado este tipo de espigão dentário.

1.2 Microtorneamento

O microtorneamento é englobado no universo da micromaquinagem, sendo esta uma das tecnologias base da micro-engenharia, a qual permite a produção de micro peças e componentes utilizados em vários tipos de aplicações. Tal processo tem vindo a ser continuamente desenvolvido e melhorado durante a última década.

Componentes miniaturizados são cada vez mais utilizados nas várias indústrias como a informática, biotecnologia, aeroespacial, ambiental, médica, têxteis, entre outras. Sistemas que usem a miniaturização podem fornecer portabilidade, descartabilidade,

melhor integração de processos, automação e principalmente um menor consumo de materiais e energia. No fabrico de micro componentes requerem-se tecnologias e processos confiáveis e precisos (Periyanan, et al., 2011).

A tecnologia da micromaquinagem ainda é recente na indústria e em algumas partes ainda não está totalmente desenvolvida. Considera-se que as operações de remoção de material que estejam entre 1 a 500 μm fazem parte da micromaquinagem e de 500 a 999 μm pertencem à escala macro (Mamat, et al., 2009).

Na indústria da micromaquinagem a precisão e velocidade são fatores importantes e necessários durante uma operação, no entanto nem todas as máquinas são adequadas para este efeito. Por consequente, as máquinas CNC são as mais apontadas, uma vez que são as únicas que podem proporcionar operações de maquinagem rápidas e precisas para peças de trabalho que envolvam formas complexas (Rahman, et al., 2010).

Um esforço integrado nessas áreas tem resultado numa mais-valia para a máquina-ferramenta, processos e equipamentos tecnológicos onde se utiliza o conceito de micromaquinagem (Figura 1.3)

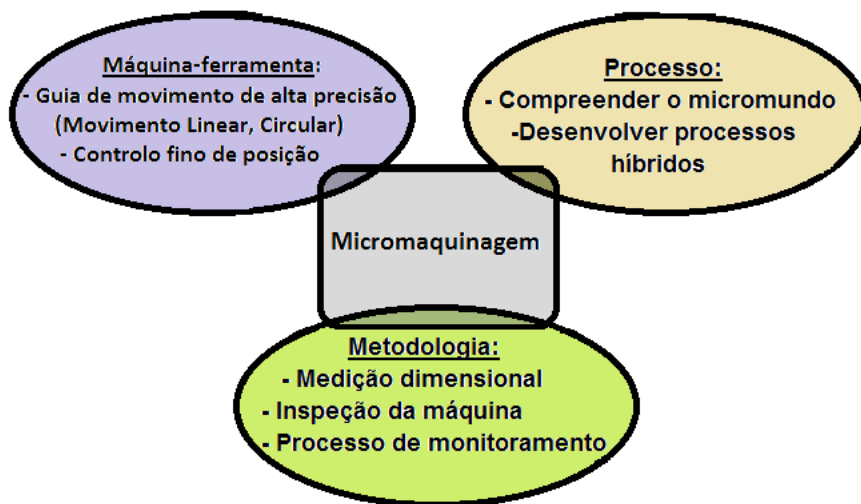


Figura 1.3 Fatores necessários para a micromaquinagem (Rahman, et al., 2010).

Na micromaquinagem existem vários tipos de operações, os mais salientes são: microfresagem, micro-moldação, microtorneamento e micro-furação. Todos estes processos têm as mesmas características da maquinagem convencional,

diferenciando-se sobretudo nas velocidades de corte e nos tamanhos reduzidos das peças produzidas. (Mamat, et al., 2009)

Neste trabalho estuda-se o processo de microtorneamento, método pelo qual foram produzidos/maquinados os espigões dentários em titânio, estando estes também vinculados ao estudo da área da endodontia.

1.3 Objetivo deste Estudo

Os espigões dentários são atualmente muito utilizados na reconstituição de dentes não funcionais. Contudo a indústria portuguesa ainda está ausente nesta área de fabrico de componentes odontológicos. Deste modo, o grande objetivo deste trabalho é estudar o projeto/fabrico de espigões dentários personalizados, com diferentes *designs* e diferentes rugosidades superficiais.

Os objetivos parcelares a atingir na realização deste trabalho são:

- Projetar/Fabricar espigões dentários personalizados em titânio com diferentes rugosidades, aplicando o conceito de microtorneamento num torno CNC convencional, garantindo-se uma boa precisão dimensional.
- Variar os parâmetros de corte, tais como, a profundidade de corte e a velocidade de avanço, analisando o seu efeito na rugosidade superficial e na geometria do espigão dentário.
- Comparar as características geométricas e de superfície, nomeadamente a sua rugosidade, dos espigões produzidos com um espigão comercial (Dentoclic®).

Em termos dimensionais, a Figura 1.4 representa um dos espigões produzidos e o espigão comercial, comparados à ponta de um porta-minas de 0,7mm e a uma moeda de um cêntimo.



Figura 1.4 Espigão comercial (esquerda) e um dos espigões maquinados (direita), comparados a um porta-minas de 0,7mm e a uma moeda de um cêntimo.

1.4 Estrutura da Presente Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, incluindo o presente capítulo de introdução. Para além destes, contempla também as referências e os anexos.

No **Capítulo 2, “Revisão Bibliográfica”**, é apresentado e descrito o processo proveniente da utilização de espigões dentários num tratamento endodôntico. São também apresentadas características importantes na escolha de um espigão a utilizar. Numa fase posterior é abordado o estado da arte do microtorneamento, processo pelo qua foram fabricados os espigões dentários.

No **Capítulo 3, “Metodologia Experimental”**, são apresentados os vários equipamentos e processos para a execução deste trabalho. É descrito a estratégia de maquinação, assim como o torno CNC empregue e os parâmetros de corte usados. São também apresentadas as características do material usado e os meios de caracterização superficial e dimensional.

No **Capítulo 4, “Resultados e Discussão”**, apresentam-se os resultados e análises obtidas do estudo da maquiagem/fabrico dos espigões dentários. São analisados e discutidos parâmetros como as rugosidades, o efeito da conicidade, o grau de tolerância (IT), a taxa de produção, o tempo de maquinagem para cada espigão, sendo estes influenciados pelos parâmetros de corte usados durante a maquinagem. Por fim, é feita uma comparação entre espigões maquinados com diferentes parâmetros de corte ao espigão comercial.

O **Capítulo 5, “Conclusões”** é o último capítulo deste trabalho, para além das referências e anexos. Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões tiradas deste estudo. São também feitas propostas para eventuais trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Quando um dente perde uma grande quantidade da sua estrutura, principalmente devido a traumas e caries dentárias, este requer uma reconstituição e o fabrico de uma nova coroa artificial no seu tratamento endodôntico. No entanto, na maioria dos casos a retenção é normalmente melhorada quando se usa um núcleo coronário e um espigão no interior do canal, pois a retenção e resistência não podem ser apenas mantidas pela estrutura residual do dente (Jang, et al., 2012).

Recentemente vários tipos de modelos de espigões dentários e núcleos coronários são usados. A retenção da coroa garantida pelo espigão é influenciada por vários fatores, incluindo a superfície do espigão, o *design* da cabeça e a resina composta do núcleo coronário (Cekic-Nagas, et al., 2011).

O principal modo de falha de um tratamento é a perda de retenção, isto é, a separação do contacto entre o espigão e o cimento de fixação ou do cimento às paredes da dentina, devido sobretudo à rugosidade deste. Com menor frequência, pode também acontecer fratura radicular do espigão (Dominic, et al., 2010).

2.1 Endodontia

A restauração de um dente severamente destruído é um desafio para os médicos dentistas. Dentes tratados endodonticamente requerem a utilização de um espigão intra-radicular. Este tem como função reter o núcleo coronário, o qual, por sua vez, irá manter a coroa (Andrea, et al., 2009).

Se a parede remanescente da raiz for demasiada fina, o uso de um espigão excessivamente grande pode comprometer a longo prazo o sucesso da reabilitação da prótese dentária. O prognóstico destas raízes enfraquecidas pode ser melhorado através de um reforço nas paredes internas da raiz, com materiais compósitos adesivos. O objetivo principal de tal reforço é criar um único conjunto entre a estrutura do dente e a estrutura do espigão. Isto pode ser conseguido utilizando cimentos de fixação, estes devem ter propriedades mecânicas semelhantes à estrutura da raiz remanescente. Vários tipos de espigões e técnicas têm sido sugeridos para a reconstrução de um dente não vital (Mahmound, et al., 2010).

2.1.1 O que é um espigão dentário?

Um espigão dentário é uma estrutura rígida colocada no canal de um dente não vital, estende-se coronalmente para assegurar a retenção do material do núcleo que suporta a coroa. O espigão tem como função estabilizar o dente tratado. (Michael, et al., 2010)

Existem dois tipos de espigões, os espigões individualizados e os espigões pré-fabricados (Leles, et al., 2004) (Cheung, 2005) (Chi-Wei Ni, et al., 2011):

- Espigões individualizados caracterizam-se por serem únicos, fabricados para um determinado paciente e determinado dente, podem ser metálicos ou não metálicos. Têm como vantagem uma melhor adaptação ao dente, pois são fabricados e preparados consoante a sua anatomia. Este tipo de espigão é o que demonstra melhor índice de sucesso. Além disso a porção coronária do núcleo faz parte do espigão, não havendo falhas na ligação espigão-coroa, fazendo este conjunto uma única peça. Apesar disso é muitas vezes abandonado por ser um processo especializado.
- Espigões pré-fabricados dividem-se em metálicos e não metálicos. Em relação aos metálicos fazem parte as ligas de cobre e latão, o titânio CP, o aço inoxidável, o TAV e o ouro. Na secção dos não metálicos os compósitos reforçados por fibras e os cerâmicos. Em relação aos espigões individualizados, estes são de uso mais fácil, prático e rápido, o custo é mais baixo e existem em vários materiais e formas. Por estas razões, estes tipos de

espigões têm uma utilização maior. Apesar disso, como são pré-fabricados podem apresentar mau desempenho em dentes com características não comuns, em que nestes a utilização de espigões individualizados é mais vantajosa.

Hoje em dia aparecem vários fabricantes de espigões dentários, com diferentes tamanhos, diâmetros e materiais. Recentemente apareceram os espigões dentários de compósitos reforçados por fibras (fibra de carbono e fibra de vidro), tentando substituir os tradicionais espigões em metal (Stewardson, et al., 2010) (Chi-Wei Ni, et al., 2011).

A escolha do tipo de tratamento e do tipo de espigão a implementar tem como base dois grandes fatores (Michael, et al., 2010):

1. Tipo de dente: Diferentes técnicas são usadas consoante os diferentes tipos de dentes (incisivos, caninos, pré-molares e molares).
2. O montante da estrutura sã do dente remanescente.

Este último fator é, provavelmente o indicador mais importante para a determinação do prognóstico. Na utilização de um espigão, se a estrutura coronal estiver praticamente intacta não é necessária a substituição total da coroa, podendo ser colocada uma resina composta para encher a cavidade de acesso ao espigão (Michael, et al., 2010).

Em relação aos dentes pré-molares e molares, estes possuem duas ou mais raízes curvilíneas, a utilização de um espigão comprido e retilíneo (Figura 1.1) nesse ambiente é quase impossível, neste caso existem espigões próprios para este tipo de dente (Figura 2.1).



Figura 2.1 Dente molar e espigão de níquel-titânio².

² Imagem retirada do sítio <http://lojavirtual.tartanhamed.com.br/categories/Odontologia/> a 01 de Fevereiro de 2013.

Num tratamento endodôntico, existem vários fatores que caracterizam um espigão dentário e a ter em conta na sua seleção, estes serão referidos nos próximos subcapítulos.

2.1.2 Comprimento do remanescente da raiz/ comprimento do espigão

O comprimento e a forma do canal da raiz remanescente determinam o comprimento do espigão radicular a usar. Sugere-se que o comprimento do canal da raiz deve ser considerado para a seleção ideal do comprimento do espigão (Fernandes, et al., 2003).

Estudos sobre a análise de tensões mostram uma melhor distribuição destas e uma melhor retenção dentro da dentina, quando o espigão é mais comprido. Da mesma forma, a resistência à fratura da raiz aumenta consoante o aumento do comprimento do espigão. Espigões longos proporcionam uma maior rigidez e menor flexão da raiz do que os espigões mais curtos (Mahmoud, et al., 2010).

No entanto pode não ser sempre possível a utilização de um espigão longo, especialmente quando o canal da raiz remanescente é curto ou curvo. Vários estudos sugerem que é importante preservar 3 a 5 mm do comprimento da guta-percha (Figura 2.2) para manter o isolamento apical (Fernandes, et al., 2003).

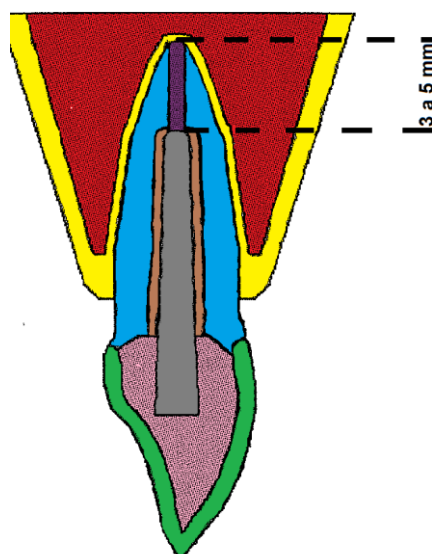


Figura 2.2 Espessura mínima da guta-percha (Castro, et al., 2003).

2.1.3 Diâmetro do espigão

Tendo em conta que o objetivo de um tratamento endodôntico é a preservação do material do dente, dentes com um espigão de maior diâmetro possuem uma maior resistência à fratura do que os dentes com um diâmetro menor (Grieznis, et al., 2006).

Segundo Fernandes et al., (2003) o aumento do diâmetro do espigão não traz efeitos benéficos em relação à sua retenção. Pelo contrário, ao aumentar em demasia o diâmetro é preciso retirar-se mais largura à dentina radicular, fragilizando assim o remanescente e por isso menor será a resistência a fratura do dente tratado.

A capacidade de um dente tratado resistir à fratura está diretamente relacionado à quantidade de dentina remanescente ao redor do espigão, ou seja, observa-se que quando se chega ao extremo, quanto maior é o diâmetro do espigão, maior será o aumento de tensões na dentina radicular (Mahmound, et al., 2010).

Recomendações sobre a quantidade adequada de dentina radicular em torno do espigão e o diâmetro do espigão, varia entre vários investigadores:

- O diâmetro do espigão tem de ter um terço do diâmetro da dentina remanescente (Peroz, et al., 2005) (Figura 2.3, (a)).
- Mahmound et al. (2010) recomendam que se preserve 1 mm de espessura da dentina em torno do canal do espigão (Figura 2.3, (b)).
- O diâmetro ótimo em relação ao diâmetro da raiz seja de 1:4 (Mou, et al., 2009) (Figura 2.3, (c)).

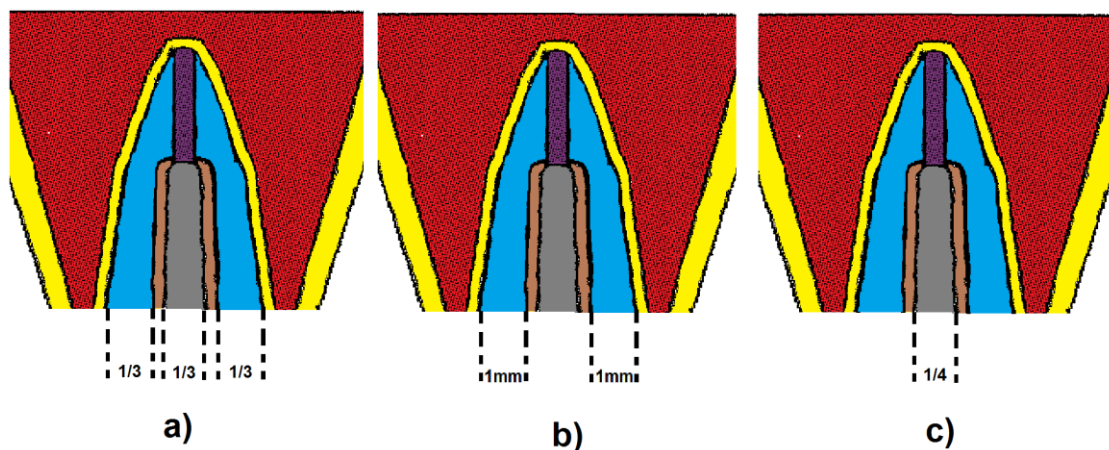


Figura 2.3 Diâmetro do espigão (Castro, et al., 2003).

Dominic, et al., (2010) concluíram que a resistência à fratura de um dente tratado é proporcional ao comprimento/diâmetro do espigão, e que este não deve ultrapassar a proporção de 16:1.

2.1.4 Design do espigão

O *design* dos espigões também influencia o sucesso da restauração. Os espigões podem ser classificados de acordo com as suas formas e características superficiais. Podem ser cilíndricos, cónicos ou uma combinação de cilíndrico-cónico. De acordo com as suas características superficiais, eles podem ser passivos ou ativos (Fernandes, et al., 2003).

Os espigões cilíndricos aumentam a retenção, produzindo uma distribuição de tensões uniforme ao longo do seu comprimento. O Espigão cilíndrico-cónico é cilíndrico ao longo do seu comprimento, exceto na porção mais apical, onde é afunilado, permitindo a preservação da dentina no ápice e ao mesmo tempo conseguindo retenção suficiente por causa da sua forma cilíndrica (Fernandes, et al., 2003) (Peroz, et al., 2005).

Os espigões ativos caracterizam-se por terem superfícies estriadas, facilitando a retenção do espigão às paredes da dentina. Em relação a estes, os espigões passivos têm uma superfície lisa e dependem de um cimento de fixação para a sua retenção e adaptação estreita à parede do canal radicular, na dentina.

As características da superfície de um espigão, como por exemplo a sua rugosidade, são um dos fatores que mais levam ao sucesso de um tratamento endodôntico, alterando a retenção e os valores da resistência à fratura deste. A maior retenção observa-se no espigão com superfície de rosca, de seguida o espigão com superfície serrilhada e por último, o espigão com superfície lisa (Fernandes, et al., 2003), (Schwartz, et al., 2004).

O espigão com superfície roscada ajusta-se à dentina e pode levar ao aumento de tensões indesejáveis dentro da raiz, em relação aos restantes espigões que exercem menor quantidade de tensão na raiz (Fernandes, et al., 2003).

Para uma boa resistência à fratura, outros estudos mostram que o *design* do espigão deve ser considerado em combinação com outros aspetos deste, como o cimento de fixação e o efeito de férula, que vão ser falados mais a frente (Peroz, et al., 2005).

2.1.5 Material do espigão

Para se obter um melhor resultado, o material a utilizar para o espigão deve ter as propriedades físicas semelhantes às da dentina, estar bem adaptado à estrutura do dente e ser biocompatível com o ambiente oral. Deve também permitir amortecer forças exercidas sobre o dente tratado, limitando a transmissão de tensões à estrutura dental remanescente. Infelizmente, os materiais utilizados nos espigões dentários, bem como os cimentos de fixação, têm propriedades físicas distintas da dentina. Os espigões podem ser classificados como metálicos e não metálicos (Fernandes, et al., 2003).

A resistência à corrosão dos espigões pode influenciar a resistência à fratura de dentes tratados (Mahmound, et al., 2010).

A corrosão dos espigões metálicos deve-se à interação eletroquímica de eletrões provenientes do cimento de fixação ou da dentina, com a superfície do espigão, através de infiltrações em torno da estrutura coronária, por microcanaís. Estes canais ocorrem aquando da preparação do espaço para o espigão ou através de uma fratura deste, não diagnosticada (Fernandes, et al., 2003).

Os produtos dessa corrosão migram através desses microcanaís dentários e criam pressão intra-tubular, podendo originar fraturas radiculares no espigão. Espigões em titânio têm uma alta resistência à corrosão quando comparados com outras ligas metálicas (Mahmound, et al., 2010).

Por outro lado, ligas de latão e cobre apresentam uma menor resistência à corrosão, sendo estas menos desejadas. Ligas de metais nobres possuem também uma boa resistência à corrosão, mas o seu custo é elevado. Com a utilização de materiais não metálicos, o fator corrosão é eliminado (Fernandes, et al., 2003).

O módulo de elasticidade da dentina é cerca de 18 GPa, na tabela seguinte (Tabela 2.1) são ilustradas algumas das propriedades de cada material usado no fabrico de espigões dentários.

Tabela 2.1 Comparação de algumas propriedades dos materiais usados em espigões dentários (Andrea, et al., 2009).

Material	E [GPa]	Resistência Mecânica	Resistência a Corrosão	Estética
Ligas de ouro	93	Boa	Boa	Baixa
Aço Inoxidável	170	Muito Boa	Boa	Muito boa
Titânio CP	112	Boa	Muito boa	Baixa
Zircônio	200	Muito Boa	Boa	Muito Boa
Fibra de Vidro	20-40	Baixa	Boa	Muito Boa
Fibra de Carbono		Baixa	Boa	Baixa
Fibra de Quartzo		Baixa	Boa	Boa
Cerâmicos		Boa	Boa	Boa

Espigões com materiais de elevado módulo de elasticidade, tais como as ligas de ouro fundidas, aço inoxidável e titânio são classificados como rígidos. Recentemente apareceram espigões de zircônio como alternativa estética. Estudos *in vitro* sugerem que espigões rígidos oferecem melhor suporte para a restauração coronária e excelente resistência à fratura. No entanto estes podem resultar em modos catastróficos quando o dente está sobrecarregado (Chi-Wei Ni, et al., 2011).

Compósitos reforçados com fibras, especificamente por fibra de vidro e fibra de carbono são um dos novos materiais usados em espigões dentários. Uma das principais vantagens é o seu módulo de elasticidade ser mais próximo ao da dentina, permitindo assim uma maior distribuição de tensões na raiz, levando então a uma menor incidência de fratura em comparação aos espigões metálicos (Dominic, et al., 2010).

Embora os espigões de fibra sejam atualmente investigados, alguns pesquisadores têm observado o aumento da tensão em torno das margens da coroa, em dentes restaurados com estes tipos de espigões, podendo prejudicar a integridade da restauração (Dominic, et al., 2010).

Como a vedação é crucial para o sucesso a longo prazo de dentes tratados, o efeito do material sobre a estabilidade do espigão e coroa deve ser considerado (Chi-Wei Ni, et al., 2011).

Devido à sua excelente biocompatibilidade e propriedades físicas, tais como baixa densidade, elevada resistência mecânica e elevada resistência à corrosão, o titânio tem sido usado como alternativa às ligas, frequentemente usadas na restauração de dentes (Menani, et al., 2008).

2.1.6 Efeito de Férula

O efeito de Férula é importante para o sucesso de um bom tratamento endodôntico com um espigão, a longo prazo (Schwartz, et al., 2004).

Este efeito foi proposto por Rosen em 1961 (Rosen., 1961) que recomenda a utilização de um colar de metal na margem gengival, para envolver o dente tratado. Permitindo aumentar assim a resistência à fratura e reforçar a superfície externa a resistir a tensões, originadas pelas sucessivas oscilações de forças exercidas ao mastigar. Por outro lado permite também manter a integridade da vedação da restauração (Mahmound, et al., 2010).

Para uma boa restauração e para que se promova o efeito de Férula é aconselhável que o colar de metal seja de 1 a 2 mm de espessura (Figura 2.4) (Schwartz, et al., 2004 e Mahmound, et al., 2010).

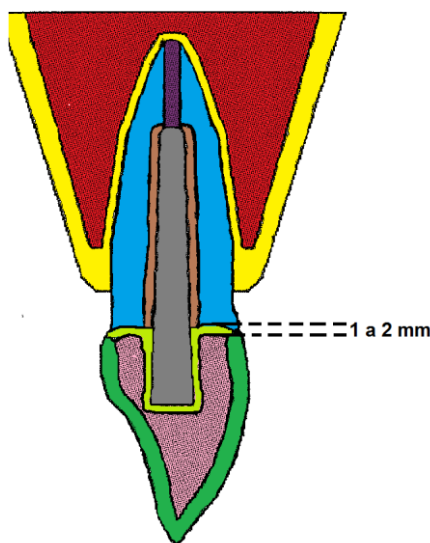


Figura 2.4 Espessura do colar de metal para o efeito de férula (Castro, et al., 2003).

2.1.7 Tipo de cimento de fixação

A restauração de dentes endodonticamente tratados com cimento de fixação é um desafio para os dentistas, nomeadamente na escolha do tipo de cimento de fixação a usar (Li, et al., 2006).

A finalidade de um espigão dentário é melhorar a retenção e manter a coroa do dente, ligando o núcleo restante à estrutura da raiz. O cimento de fixação pode reduzir a probabilidade de falhanço deste tratamento, aumentando a resistência à fratura do dente tratado (Jang, et al., 2012).

Entre todas as propriedades do cimento de fixação, o módulo de elasticidade é o fator que mais afeta a redistribuição de tensões na restauração. As tensões são passadas para a dentina radicular de duas formas: uma é passada diretamente da coroa do dente à dentina radicular e a outra é passada do espigão e do cimento de fixação para a dentina radicular. Esse efeito pode ser reduzido com uma boa seleção de cimento de fixação, isto é, escolhendo um com o módulo de elasticidade mais próximo ao da dentina, reduzindo então as incidências de fraturas na raiz (Li, et al., 2006).

Qualquer um dos cimentos pode ser usado com sucesso juntamente com um espigão, desde que se siga os princípios adequados de fixação. Os agentes de fixação mais comuns são: fosfato de zinco, cimentos resinosos e ionómero de vidro (Schwartz, et al., 2004).

Segundo Menani et al. (2008) os melhores cimentos de fixação são o fosfato de zinco e o cimento de resina. Estes investigadores compararam a utilização desses 2 tipos de cimento de fixação. Concluíram que a retenção entre os dois tipos de cimento é semelhante.

2.1.8 Tipo de material para o núcleo coronário

A finalidade do espigão é reter o núcleo, e este por sua vez ajuda a reter a coroa. O núcleo é formado diretamente sobre o espigão ou indiretamente sobre um molde. A forma geral e a sua orientação são desenvolvidas durante o seu fabrico. O espigão é utilizado em combinação com uma acumulação de material restaurador, sendo este o núcleo coronário, e é formado após a cimentação do espigão. Em relação ao tipo do material do núcleo, existe como opção: amálgama, resina composta ou ionómero de vidro (Schwartz, et al., 2004).

Por fim, visto a parte biomecânica da utilização de espigões dentários, e descritos alguns processos e características destes na restauração de dentes tratados endodonticamente, passar-se-á de seguida para a parte mecânica, ou seja, o

processo pelo qual é fabricado um espião dentário, processo este denominado de microtorneamento, alinhando este no vasto mundo da micromaquinagem.

2.2 Microtorneamento

No fabrico de micro peças e componentes requer-se métodos fiáveis, repetíveis e precisos. Micromaquinagem é um método de fabrico de dispositivos em miniatura e componentes com características que variam entre as dezenas de micrómetros e alguns milímetros de tamanho (Figura 2.5) (Chae, et al., 2006) (Muammer et al., 2011).

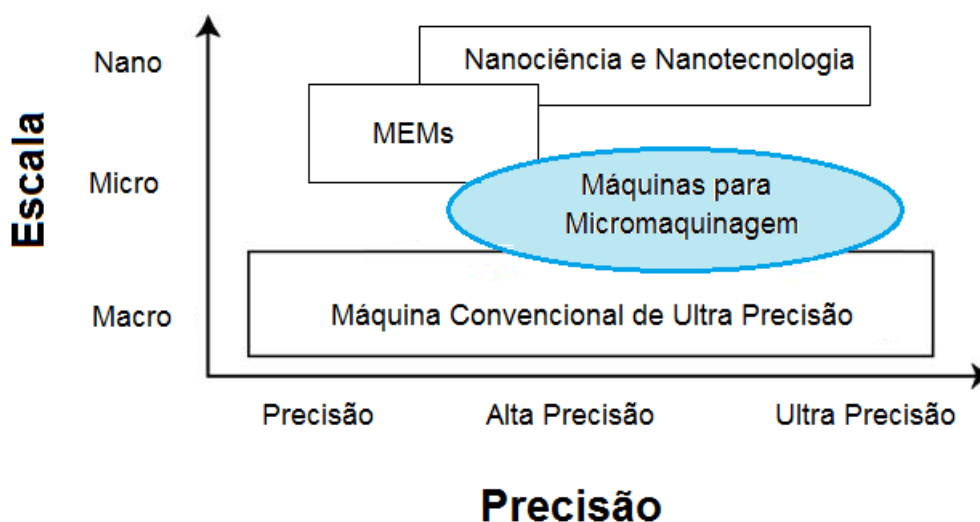


Figura 2.5 Dimensões para a micromaquinagem (Chae, et al., 2006).

São necessários vários fatores a ter em conta durante uma operação de micromaquinagem. O controlo preciso dos parâmetros da máquina para maquinar, tais como a velocidade de avanço, profundidade de corte e a velocidade de corte são importantes (Mamat, et al., 2009).

No grupo dos processos tecnológicos de micromaquinagem faz parte o microtorneamento. É um processo de remoção de material que é miniaturizado. Microtorneamento tem a capacidade de produzir peças na escala micrométrica. A principal desvantagem deste processo é causada pela força de corte, influenciando a precisão da maquinagem e o limite máximo do comprimento a maquinar (Alberto, et al., 2010) (Rahman, et al., 2010).

Semelhante às operações de maquinagem convencionais, o microtorneamento trabalha as superfícies dos materiais usando ferramentas para esse efeito. A técnica de microtorneamento traz várias vantagens no fabrico de peças miniaturizadas e na sua rugosidade, podendo produzir microcomponentes a um custo eficaz, não havendo tanta necessidade de desperdício de material e energia como no torneamento convencional. O processo é adequado para acomodar os componentes individualmente, ou seja, em vez de ser em tamanhos e lotes de grandes dimensões, tem a capacidade de se poder controlar a qualidade do processo, de modo a serem corrigidos eventuais erros durante o fabrico (Chae, et al., 2006).

O microtorneamento compõe parte do processo da micromaquinagem, usa ferramentas sólidas e o seu procedimento de remoção de material é quase semelhante ao torneamento convencional. Peças na escala micrométrica podem ser produzidas através do microtorneamento, para tal a programação e o controlo numérico terão de ser aplicados, conferindo precisão nos movimentos das ferramentas e nos vários parâmetros associados à maquinagem (Periyanan, et al., 2011) (Mamat, et al., 2009).

Na escala micrométrica, a precisão é muito importante, no entanto há outros problemas que têm de ser considerados numa operação de microtorneamento. Uma das questões mais importantes é o facto da força de corte tender a fletir a peça de trabalho durante a operação. A precisão na maquinagem é afetada e isto limita o tamanho máximo da peça. Durante a operação, a força de avanço da ferramenta desvia a peça de trabalho. Esse desvio provoca vibrações na direção tangencial da região, prolongando-se estas ao longo do comprimento da peça (Chae, et al., 2006) (Mamat, et al., 2009).

Como o diâmetro da peça de trabalho é reduzido, a rigidez da peça é menor, neste caso a força de corte pode provocar uma flexão na peça. Dado que o valor da força está relacionada com a área a maquinar, a velocidade é aumentada para diminuir a força de corte produzida. São necessárias velocidades mais altas de rotação numa operação de microtorneamento, para se obter o melhor corte (Mamat, et al., 2009).

2.2.1 Forças de maquinagem

O controlo da força de maquinagem é importante. O valor da força de corte deve ser menor do que o valor que provoca a deformação plástica da peça a trabalhar,

minimizando assim a flexão da peça de trabalho durante a operação (Chae, et al., 2006).

Os efeitos dos parâmetros corte como a profundidade, a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a análise das aparas serão individualizados e discutidos nas secções seguintes.

2.2.1.1 Efeito da profundidade de corte

Microtorneamento é um processo convencional de remoção de material, que tem sido miniaturizado ao longo da última década. O problema mais grave encontrado durante o microtorneamento é a força de corte, que tende a fletir a peça de trabalho (Figura 2.6) (Azizur Rahman, et al., 2005).

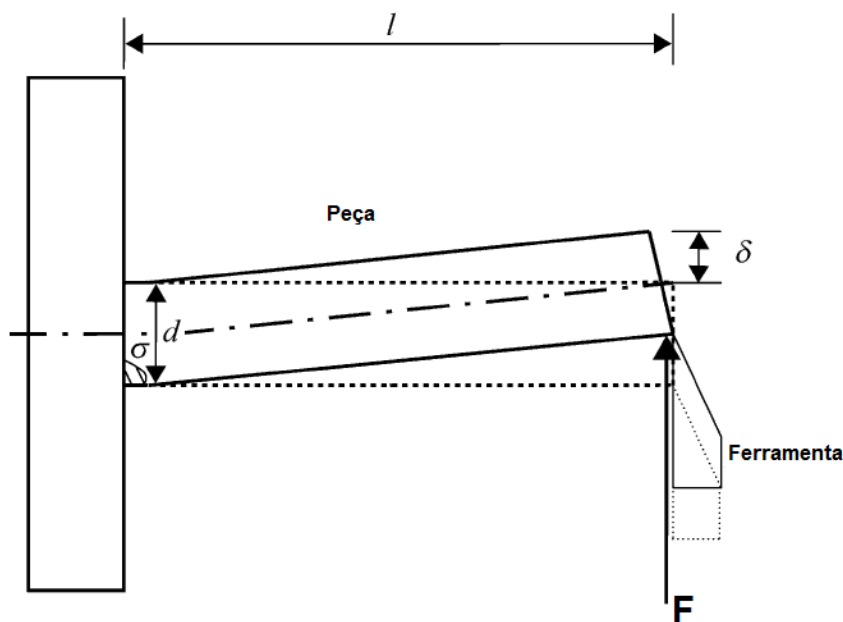


Figura 2.6 Deflexão de uma peça num processo de torneamento (Azizur Rahman, et al., 2005).

Este efeito tem sido constantemente estudado e têm vindo a surgir várias técnicas para eliminar este problema de deformação da peça, durante a operação. O comprimento (l) para que no eixo não ocorra o efeito de flexão é estimado aplicando as equações de resistência do material (Equações. (1) e (2)) (Azizur Rahman, et al., 2005).

Durante a operação de torneamento, a força de corte é importante para determinar a deflexão causada na peça. Uma das maneiras de se poder reduzir essa deflexão é diminuindo a rigidez de acordo com uma diminuição do diâmetro da peça a torner, apesar de essa hipótese causar ainda mais problemas. Numa outra alternativa, reduzindo a força de corte para um nível suficientemente baixo, a deflexão da peça pode ser minimizada. Se F é a força de reação sobre a ponta da ferramenta, d o diâmetro da peça cilíndrica, E o módulo de elasticidade do material, a deflexão (δ) na peça e a tensão máxima produzida (σ) podem ser traduzidas através das equações (1) e (2), como se segue (Chae, et al., 2006), (Azizur Rahman, et al., 2005):

$$\delta = \frac{Fl^3}{3EI} = \frac{64Fl^3}{3\pi Ed^4}$$

Equação. (1)

$$\sigma = \frac{32Fl^3}{\pi d^3}$$

Equação. (2)

O Comprimento da peça (l) para que no eixo não ocorra deflexão, pode ser então calculado.

Em suma, a tensão máxima que emerge da peça de trabalho deve ser inferior à tensão de cedência do material (Azizur Rahman, et al., 2005).

Uma boa programação da máquina-ferramenta é essencial para o sucesso de uma boa micromaquinagem, para tal são fornecidos conjuntos de coordenadas e parâmetros ordenados por códigos, que constituem um controlo numérico para que as dimensões na ordem dos micrometros sejam alcançadas (Chae, et al., 2006) (Azizur Rahman, et al., 2005).

A profundidade de corte (P) é dos parâmetros de corte mais influentes no microtorneamento. Para valores de profundidades de corte baixos, a força de avanço é a força dominante. No entanto, a grandes profundidades de corte, o valor força tangencial é maior do que a força de reação, ou seja, a força de corte diminui consoante a diminuição da profundidade de corte, minimizando assim o efeito de flexão na peça a maquinar (Chae, et al., 2006).

2.2.1.2 Efeito da velocidade de avanço e velocidade de rotação

Azizur Rahman et al. (2005) concluíram que com o aumento da velocidade de avanço, a área de contacto entre a peça-ferramenta também aumenta. Como resultado, é aumentada a taxa de remoção de material, contribuindo esta para o aumento da força. Um aumento na velocidade de rotação resulta numa diminuição da taxa de remoção de material, reduzindo a força da ferramenta, devido à redução da duração do contacto peça-ferramenta. Por consequente, as forças de reação diminuem com o aumento da velocidade de rotação.

Mamat et al. (2009) chegaram às mesmas conclusões, mostrando que as forças de corte diminuem consoante o aumento da velocidade de rotação. Através de várias pesquisas, demonstraram que a força de corte específica aumenta quando a área de corte diminui, e em seguida decresce até um determinado limite. Isto mostra que o incremento da área de corte aumenta a força de corte. Assim a deformação e a força de corte podem ser controladas ajustando a força e o diâmetro da peça. Para minimizar a deflexão da peça de trabalho e evitar a deformação plástica, o comprimento da peça pode ser ajustado. Este ajuste pode ser determinado usando as Equações (1) e (2).

O aumento da velocidade de avanço dá origem a um aumento quase linear das forças axiais e tangenciais. Com o aumento da velocidade de rotação, a resistência ao atrito entre a peça-ferramenta decresce, isto porque existe uma menor taxa de remoção de material reduzindo assim as componentes das forças (Azizur Rahman, et al., 2005).

Num caso ótimo devemos ter baixas velocidades de avanço a altas rotações, e baixos incrementos de profundidade de corte, diminuindo a área de contacto peça-ferramenta e minimizando qualquer tipo de forças envolvidas na ocorrência de flexão da peça durante a maquinagem.

2.2.1.3 Análise das aparas

A formação da apara é um processo dinâmico, que é muitas vezes de natureza não linear. Compreender a formação da apara é importante para uma previsão precisa das forças de corte associadas (Chae, et al., 2005).

Azizur Rahman et al. (2005) verificaram que para baixas profundidades de corte as aparas formadas apresentavam estruturas do tipo lasca. Com o aumento da profundidade de corte, estas apresentam-se de uma forma regular e helicoidal longa em gume, sendo menos favorável do que a do tipo lasca (Figura 2.7). Em condições de velocidades elevadas, as aparas tendem a quebrar. Analisaram também a superfície inferior da apara, a que está em contacto com a ferramenta, esta apresenta uma superfície muito mais contínua e regular do que a superfície superior, que é deformada plasticamente, originando uma superfície serrilhada.


Helicoidal em gume Longa	Lasca
	
Médio	Favorável

Figura 2.7 Forma da apara, ISO 3685 (Davim et al., 2006).

2.2.2 Efeito dos parâmetros de corte na rugosidade superficial

A qualidade da máquina-ferramenta é de grande importância na maquinagem de peças com tamanho reduzido, afetando a rugosidade superficial e repetibilidade dimensional. O efeito das velocidades e da profundidade de corte são dos parâmetros que mais influenciam na rugosidade superficial das peças maquinadas (Chae, et al. 2005) (Lim, et al, 2007).

Adair et al. (2011) demonstraram que a diminuição no incremento dos parâmetros de corte, tais como a velocidade de corte e a profundidade de corte produzem superfícies com rugosidades mais baixas.

Neste caso específico, as alterações dos parâmetros de corte, tais como a profundidade de corte e a velocidade de avanço influenciam na rugosidade superficial dos espigões dentários maquinados. Espigões dentários com uma rugosidade superficial maior apresentam melhor adesão ao cimento de fixação e por consequente

a sua retenção é melhorada, apresentando menor índice de falha (Balbosh, et al. 2005).

Menani et al. (2008) também demonstraram que o valor da rugosidade é importante na retenção de espigões dentários ao cimento de fixação, cimentos como o fosfato de zinco e cimentos resinosos apresentam similar valor de retenção.

2.3 Síntese

Uma das principais dificuldades na micromaquinagem é a de a máquina-ferramenta ser ou não adequada para o fabrico de peças miniaturizadas, com exigentes propriedades requeridas. A restrição imposta pela precisão que é necessária para o fabrico numa máquina-ferramenta, tais como os CNC convencionais, poderão não cumprir. Existem vários fatores como a deformação mecânica e térmica, vibrações da máquina que podem restringir a maquinagem de peças pequenas. Pelo contrário, máquinas de ultra-precisão podem garantir um alto grau de precisão e movimento mas são extremamente dispendiosas, exigem manutenção especializada e regular e não incluem instalações para processos mais compostos. Além disso ambas as máquinas ocupam um espaço consideravelmente grande, consumindo muita energia. Apesar desses fatores os tornos CNC convencionais continuam a ser utilizadas para a micromaquinagem, proporcionando um verdadeiro desafio na realização de tal processo (Rahman, et al., 2010).

Como foi visto neste capítulo, fatores como o comprimento, o diâmetro, o *design*, o tipo de material, o efeito de férula, o tipo de material para o núcleo coronário e a rugosidade dos espigões são determinantes num bom desempenho e numa boa seleção de um espigão num tratamento endodôntico. O microtorneamento é o processo pelo qual é fabricado este tipo de prótese dentária. O efeito da força de corte é um fator importante a ter em conta para uma boa maquinagem. Profundidades de corte e velocidades de avanço baixas, com elevadas velocidades de rotação diminuem o efeito da força de corte, que por consequente diminui a flexão da peça na base. Tendo em conta todos estes fatores aferiu-se que é possível o projeto/fabrico de espigões dentários personalizados em titânio CP, com *designs* específicos e diferentes rugosidades superficiais.

3. Metodologia Experimental

Neste capítulo vão ser apresentados todos os métodos e equipamentos que foram usados no desenvolvimento deste trabalho e na obtenção de resultados. Começando pelo tipo de material, torno CNC, ferramentas e parâmetros de corte empregues, estratégia de maquinagem e finalizando com os equipamentos para a caracterização superficial e dimensional.

3.1 Material Utilizado

Em qualquer processo de maquinagem, o tipo de material a maquinar é importante. Neste trabalho de investigação o material utilizado foi o titânio CP Grau2 (UNS R50400), como especificação ASTM F76 (titânio puro para aplicações médicas).

O titânio R50400 fornecido por cortesia pela empresa TiFast® é um titânio CP e é o tipo de titânio mais comum em aplicações que requerem resistência à corrosão, utilizado em diversos meios agressivos. Isto é, em parte devido à sua baixa densidade e resistência à corrosão. Pode ser facilmente soldado e maquinado. É amplamente empregue em diversos tipos de indústria: Indústria-química, petróleo e gás, aeronáutica, biomédica, térmica, entre outras.

A Tabela 3.1 apresenta as diversas características químicas e mecânicas deste tipo de titânio, retiradas do certificado de qualidade do material, apresentado no anexo A1.

Tabela 3.1 Características químicas e mecânicas do titânio Grau 2.

Conteúdo	O%	H%	N%	C%	Fe%	Resistência à tração	Tensão de cedência	Extensão %
Comp (Wt.%)	0.134	0.004	0.012	0.020	0.095	482 MPa	354 MPa	25

Para o efeito deste trabalho foi usada uma barra de titânio CP de Grau2 com 10 mm de diâmetro e 500mm de comprimento, como mostra na Figura 3.1.



Figura 3.1 Barra de Titânio CP Grau 2 com 10mm de diâmetro e 500mm de comprimento.

3.2 Desenho do Espigão a Maquinar

O espigão radicular a ser maquinado, é um espigão cilíndrico-cônico idêntico ao espigão comercial (Dentoclic®) (Figura 1.1).

Tem como principais dimensões 1,7mm de diâmetro e 17,5 mm de comprimento, em anexo (A2) encontra-se o desenho técnico do espigão.

3.3 Torno CNC

O processo de torneamento é dos processos mais utilizados em maquinagem, predominante em quase todos os tipos de indústria.

O torno CNC usado para fazer este trabalho foi o KMHP 50 da Kingsbury (Figura 3.2), presente no Laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da UA, este consegue atingir as 4500 rpm.



Figura 3.2 Torno CNC usado na maquinagem dos espigões.

É construído principalmente por um painel, onde são inseridos os dados para a maquinagem, uma bucha onde é fixada a peça a maquinar e uma torreta (Figura 3.3), podendo esta levar 11 tipos de ferramentas.

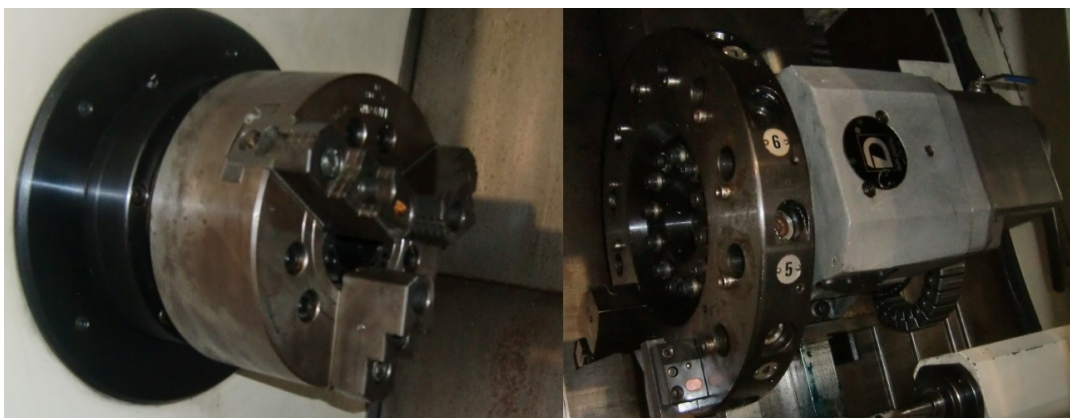


Figura 3.3 Bucha e torreta do torno.

3.4 Ferramentas de Corte

No mercado atual, existe uma vasta gama de ferramentas e porta-ferramentas para o processo de desbaste em torneamento, mas no que diz respeito ao microtorneamento a oferta é mais reduzida. A escolha da ferramenta e do porta-ferramentas é um dos fatores mais importantes para a obtenção de superfícies com boa qualidade e precisão dimensional.

Neste trabalho foi escolhido uma ferramenta de tamanho reduzido, apropriada para o torneamento de peças pequenas.

A ferramenta utilizada para o fabrico dos espigões é uma ferramenta rômica de 55°, DCMW – 11T302 SM10 (Figura 3.4) com as formas e características descritas na Tabela 3.2

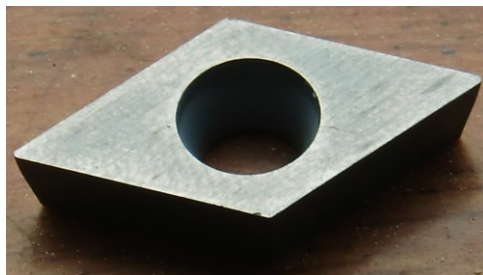



Figura 3.4 Ferramenta rômica utilizada na maquinagem.

Tabela 3.2 Forma e características da ferramenta usada.

Forma da Ferramenta	Ângulo de Ponta	Ângulo de Folha	Ângulo de Posição (k_r)	Ângulo de Ataque (γ)	Ângulo de Inclinação (τ_s)	Raio de Ponta (r_e)
	55°	7°	93°	0°	0°	0,2

A ferramenta é fixa por um parafuso de fixação ao porta ferramentas. O porta-ferramentas usado é o SDJCL 2020K11 (Figura 3.5).



Figura 3.5 Porta-ferramentas SDJCL 2020K11.

3.5 Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte são dos fatores mais importantes a ter em conta para uma boa maquinagem, nomeadamente na obtenção de uma boa qualidade superficial e dimensional da peça.

Neste caso, como se trabalha numa escala micrométrica, a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte são fatores importantes a serem estudados.

3.5.1 Velocidade de corte

Considerando para efeito de estudo a barra previamente maquinada com diâmetro final de 3mm, devidos a motivos de segurança e de estabilidade, o torno CNC deve trabalhar a uma velocidade máxima de 3000rpm. O valor da velocidade de corte aplicado foi calculado e varia consoante a Figura 3.6.

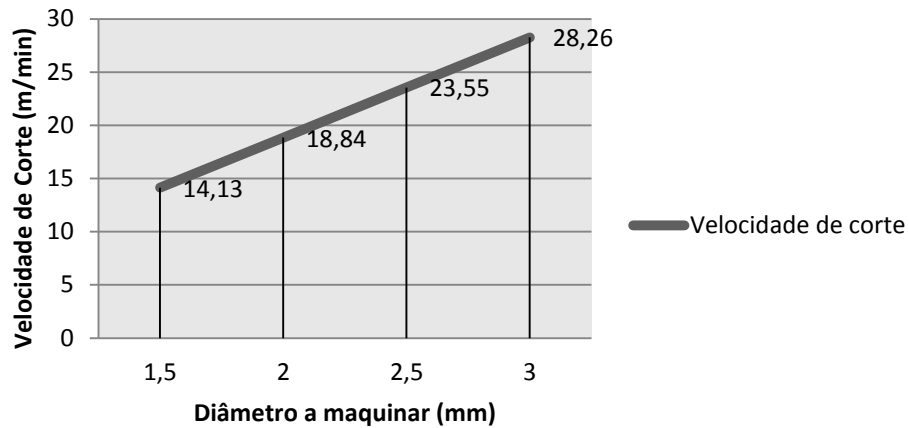


Figura 3.6 Velocidade de corte usadas na maquinagem.

Inicialmente, a velocidade de corte utilizada num diâmetro de 3mm é de 28,25 m/min, esse valor decresce automaticamente consoante a diminuição do diâmetro a cada passagem. Por fim na última passagem, como o espigão tem como diâmetro final 1,7 mm, a velocidade de corte nesse ponto é de aproximadamente 16,01 m/min.

3.5.2 Velocidade de avanço

Para um bom acabamento superficial e uma boa precisão dimensional da peça, a velocidade de avanço é um parâmetro importante.

Foram utilizados quatro valores de velocidade de avanço (Tabela 3.3), estes combinados com a profundidade de corte permitem obter uma combinação de doze resultados a serem analisados posteriormente.

Tabela 3.3 Velocidades de avanço usadas.

Velocidade de Avanço ($\mu\text{m}/\text{rot}$)			
100	50	25	12,5

3.5.3 Profundida de corte

Da mesma maneira que os restantes parâmetros, a profundidade de corte é um parâmetro a ser estudado e a ter em conta na micromaquinagem. Quanto maior o valor de P mais potência é necessária por parte da máquina para efetuar a operação.

Foram utilizados três valores de profundidade de corte, apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Profundidades de cortes usadas.

Profundidade de corte (μm)		
80	40	20

3.6 Estratégia de Maquinagem

Devido aos 10 mm de diâmetro da barra foi necessário um desbaste até se obter 3mm de diâmetro. Apenas a partir desse é que foram tirados dados para o estudo.

Um dos fatores mais importantes a ter em conta antes da maquinagem é o fator de esbelteza, para se verificar qual a dimensão máxima possível de maquinar, principalmente no que diz respeito ao processo de microtorneamento, em que as peças têm de garantir dimensões e formas desejadas. Um estudo foi previamente feito antes de começar a maquinagem, pois se uma peça for demasiada comprida para um determinado diâmetro, esta pode apresentar efeito de conicidade ou num caso mais extremo fraturar.

Na Figura 3.7 está representada a relação aconselhada entre o comprimento e o diâmetro, pela equação (3).

$$l = 5d$$

$$\frac{l}{d} = 5$$

Equação. (3)

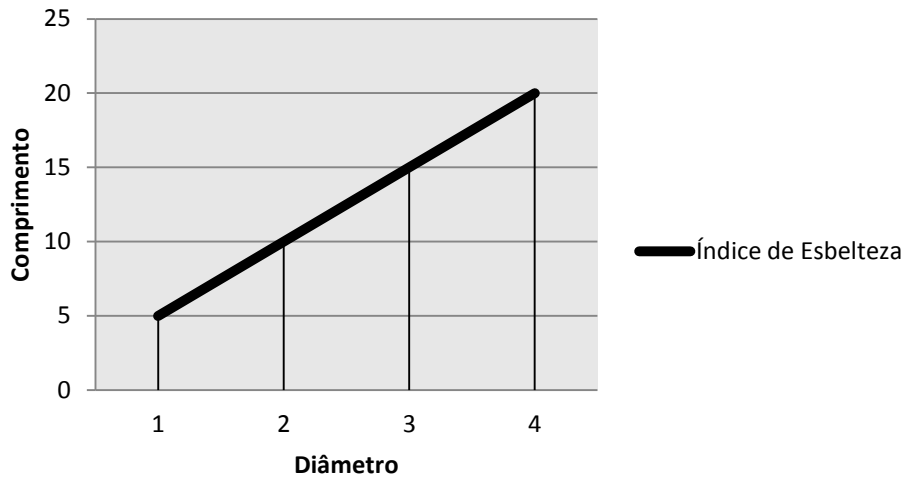


Figura 3.7 Relação l/d.

Em termos de estratégia de maquinagem, numa primeira fase tentou-se maquinar o espigão no seu comprimento total, com os parâmetros de corte menos severos ($P=20\mu\text{m}$ e $a=12,5\mu\text{m/rot}$). Verificou-se que esta estratégia era impossível, pois o espigão partia sempre na sua extremidade da base, devido à grande relação l/d. Optou-se então por outra estratégia de maquinagem, em que esta se divide em três partes, inicialmente a maquinagem da parte do cone (Figura 3.8), a maquinagem da parte do corpo (Figura 3.9) e por fim a forma final do espigão (Figura 3.10). Com este tipo de estratégia garantiu-se estabilidade na base, minimizando a vibração durante a maquinagem.

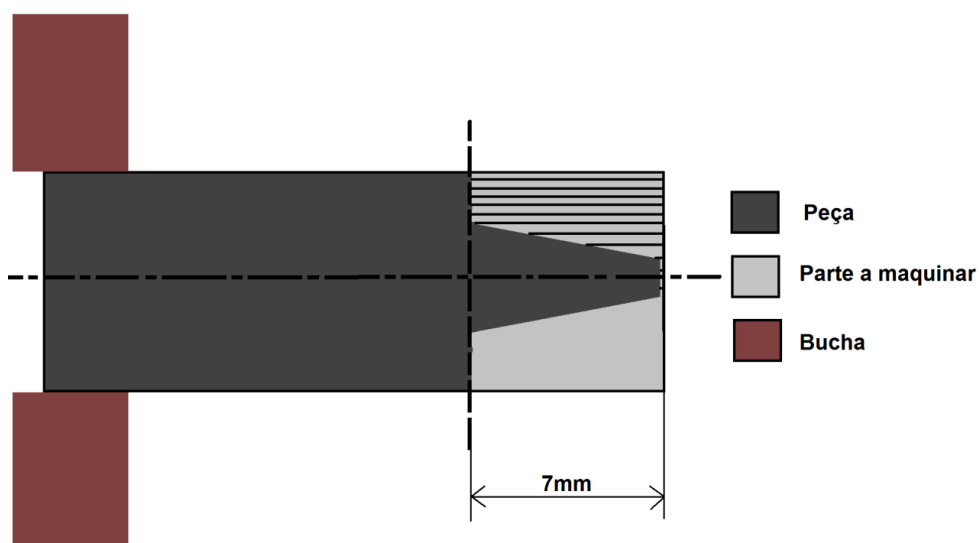


Figura 3.8 Primeira parte da maquinagem do espigão, desbaste do cone.

Após a formação da parte do cone, com passagens horizontais, passa-se para o desbaste da parte do corpo, minimizando assim as forças que levam a peça a defletir, garantindo um bom acabamento na parte cónica.

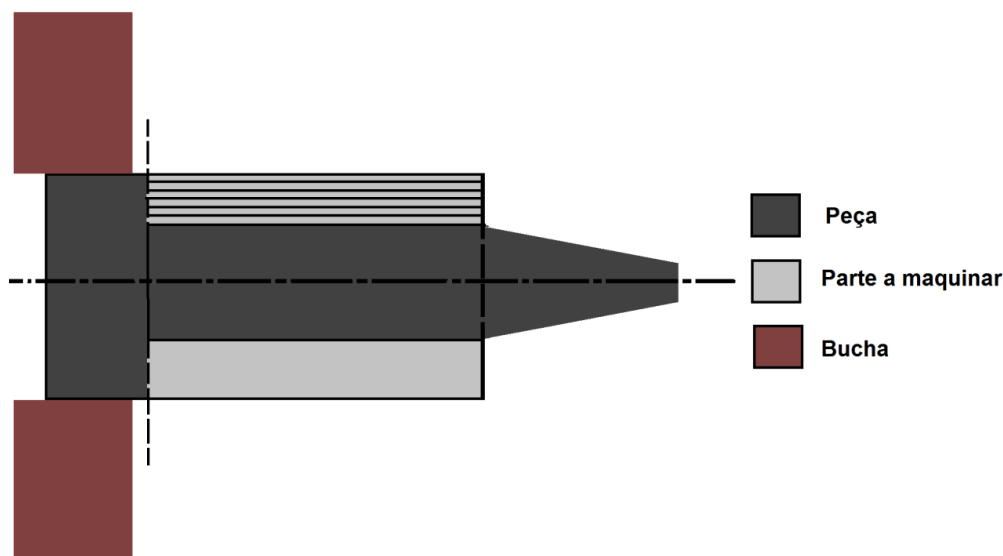


Figura 3.9 Segunda parte da maquinagem, desbaste do corpo.

Na segunda parte, as passagens são na mesma horizontais, garantindo um bom acabamento da parte do corpo do espigão.

Por fim, efetuam-se dois pequenos entalhes no corpo do espigão formando-se a forma em v e um pequeno chanfro na parte contrária ao cone, compondo assim a cabeça do espigão.

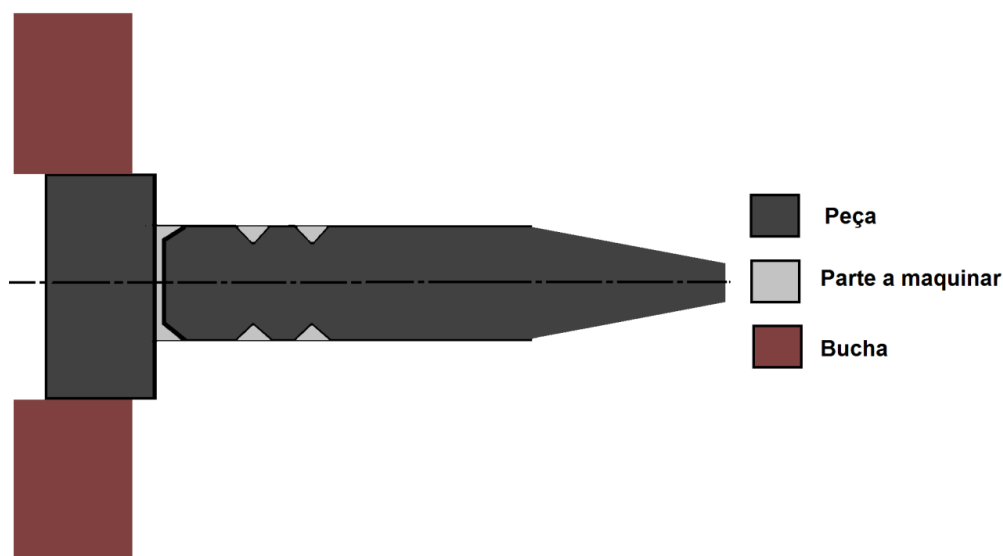


Figura 3.10 Terceira parte da maquinagem, desbaste final.

O código CNC utilizado para a maquinagem dos espigões encontra-se no anexo A3. De salientar que se usou fluido de corte em toda a maquinagem dos espigões.

3.7 Caracterização das Superfícies Maquinadas

Os resultados foram analisados através do rugosímetro, conferindo uma análise ao acabamento superficial e do microscópio para a análise microscópica de possíveis defeitos, como a formação de rebarbas nos espigões maquinados.

3.7.1 Rugosímetro

Para o estudo da análise superficial, foi utilizado o rugosímetro Hommel Tester T1000 E (Figura 3.11) com impressora integrada. Tem como principais características uma resolução máxima de $0,01\mu\text{m}$, um campo de medição de cerca de $80\mu\text{m}$, um cut-off (LC) de 0,25 e 0,8, categoria 1 de precisão conforme DIN4772 e é equipado com um menu de controlo e um ecrã para a apresentação gráfica dos resultados.



Figura 3.11 Rugosímetro Hommel Tester T1000 E.

As principais características retiradas para o estudo superficial dos espigões são as que se encontram na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 Rugosidades e sua descrição.

Designação	
Ra	Rugosidade média aritmética
RzD	Profundidade média da rugosidade, norma DIN 4768 (média aritmética)
RzI	Profundidade média da rugosidade, norma ISO 468 (média geométrica)
RmD	Rugosidade média (norma DIN)
Rt	Amplitude da rugosidade
Rp	Profundidade máxima de aplainamento
Rpm	Profundidade média de aplainamento
Rq	Rugosidade média geométrica
R3z	Rugosidade média do 3º pico ao 3º vale
Pt	Amplitude do perfil
Pc	Número de picos no perfil
Sm	Passo médio da rugosidade

A medição da rugosidade foi feita em três pontos dos espigões, conforme mostra a Figura 3.12. Estes são separados aproximadamente em 120°, a apalpação é feita ao longo do comprimento do espigão e por fim é calculada a média das rugosidades entre essas três referências.

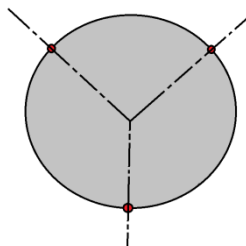


Figura 3.12 Pontos de medição da rugosidade.

3.7.2 Análise microscópica

Para a análise superficial e levantamento das dimensões do espigão foram utilizados dois microscópios, o primeiro foi o microscópio da Mitutoyo TM (Figura 3.13), tem como principais características uma ampliação de 30X e dois pratos micrométricos que possibilitam efetuar medições.

Este microscópio foi utilizado sobretudo para o levantamento das medidas dos espigões.



Figura 3.13 Mitutoyo TM com 30X de ampliação.

O segundo microscópio utilizado foi o microscópio ótico Nikon Eclipse Lv 150 (Figura 3.14), este tem como principais características uma ampliação máxima de 1000X e um sistema de vídeo para a análise da imagem no computador. Este microscópio foi utilizado para o estudo da superfície dos espigões torneados.



Figura 3.14 Microscópio ótico Nikon Eclipse Lv 150.

Para estudar a existência do efeito de conicidade nos espigões torneados, foram feitas três medições ao longo do comprimento do espigão, nas duas extremidades do corpo e na extremidade da parte cônica, como mostra na Figura 3.15.

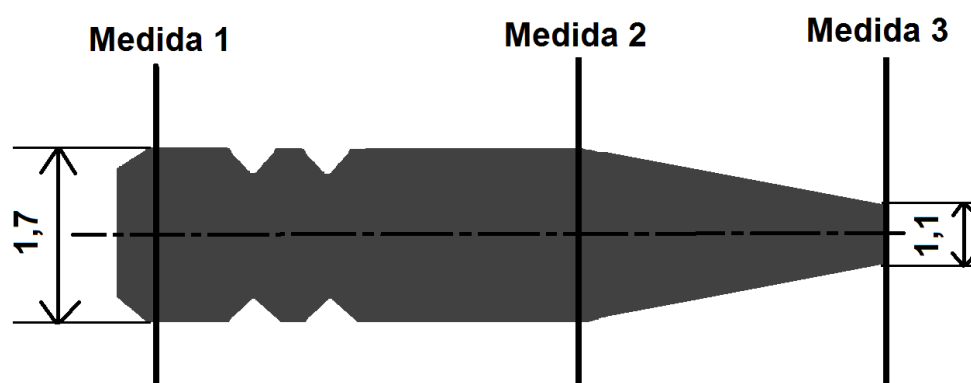


Figura 3.15 Medições para o estudo do efeito de conicidade nos espigões maquinados.

4. Resultados e Discussão

Ao longo deste trabalho foram obtidos resultados que serão analisados e discutidos neste capítulo.

Inicialmente estudou-se o efeito da variação dos parâmetros de corte na qualidade superficial, nomeadamente na rugosidade média aritmética (Ra) e na amplitude de rugosidade (Rt), são apresentados também os perfis de rugosidade e das superfícies de cada espigão maquinado. De seguida é calculada a taxa de produção, relacionando-a com o valor de Ra para cada combinação de profundidade de corte e velocidade de avanço. É apresentada a relação entre o grau de tolerância (IT) em função da velocidade de avanço para cada espigão maquinado.

Posteriormente estudou-se a geometria dos espigões maquinados, analisando o efeito de conicidade de cada um. De seguida, é feita uma comparação de características entre os espigões maquinados e o espigão comercial (Dentoclic®).

Por fim, tendo em conta o tempo de maquinagem e outros parâmetros relacionados com a rugosidade da superfície e forma dimensional, é proposta uma equação (função objetivo) que otimiza a maquinagem e escolha dos espigões dentários

4.1 Avaliação dos Parâmetros de Maquinagem

4.1.1 Rugosidade média aritmética (Ra)

A variação dos valores de rugosidade média aritmética (Ra) em função da velocidade de avanço (a), para as três diferentes profundidades de corte (P) está representada na Figura 4.1.

Verifica-se que, em relação à profundidade de corte, a velocidade de avanço é o parâmetro que mais influência tem no valor de Ra. Obtendo-se espigões com menor Ra com o decréscimo da velocidade de avanço.

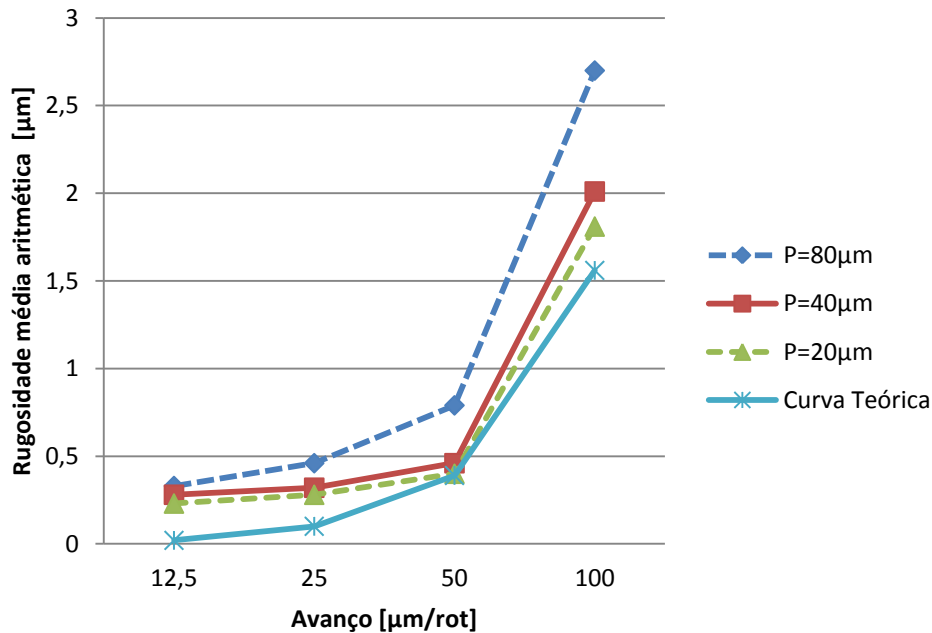


Figura 4.1 Rugosidade média aritmética em função do avanço e da profundidade de corte.

A relação entre estas duas variáveis é quadrática. Partindo da Equação. (4) onde a é a velocidade de avanço e r o raio da ponta de ferramenta ($r=0,2$), obteve-se a curva dos valores teóricos de Ra. Comparando as curvas obtidas à curva teórica verifica-se que todas elas têm o mesmo comportamento, apresentando valores maiores.

$$Ra_t = \frac{a^2}{32 \cdot r} 1000$$

Equação. (4)

O Ra do espigão comercial é de $0,34\mu\text{m}$, para avanços inferiores a $25\mu\text{m/rot}$ e profundidades de corte inferiores a $40\mu\text{m}$, os valores de Ra dos espigões maquinados apresentam-se inferiores ao valor de Ra do espigão comercial.

4.1.2 Amplitude da rugosidade (Rt)

A variação dos valores de amplitude da rugosidade (Rt) em função da velocidade de avanço (a), para as três diferentes profundidades de corte (P) está representada na Figura 4.2.

Verifica-se a mesma analogia que a figura anterior, em relação à profundidade de corte, a velocidade de avanço é o parâmetro que mais influência tem no valor de R_t , estas apresentam uma relação quadrática entre si.

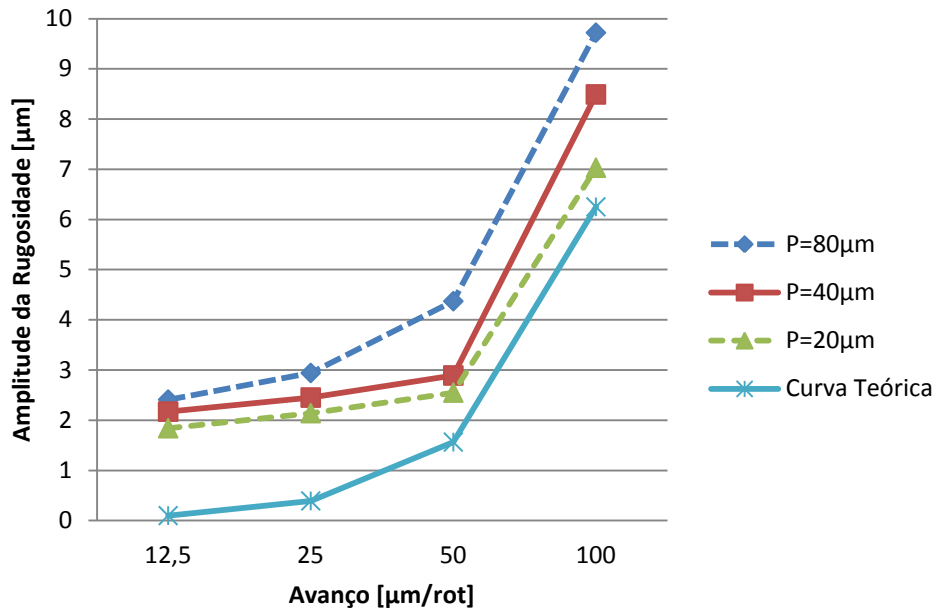


Figura 4.2 Amplitude da rugosidade em função do avanço e da profundidade de corte.

Partindo da Equação. (5) onde a é a velocidade de avanço e r o raio da ponta de ferramenta ($r=0,2$), obteve-se a curva dos valores teóricos de R_t . Comparando as curvas obtidas à curva teórica, verifica-se que todas elas têm o mesmo comportamento, apresentando estas valores maiores.

$$Rt_t = \frac{a^2}{8 \cdot r} 1000$$

Equação. (5)

O R_t do espigão comercial é de $3,23\mu m$, para avanços inferiores a $50\mu m/rot$ e profundidades de corte inferiores a $40\mu m$, os valores de R_t dos espigões maquinados são inferiores ao valor de R_t do espigão comercial.

4.1.3 Outros parâmetros de rugosidades

Na Tabela 4.1 podem ser observados todos os parâmetros de rugosidade medidos em cada espigão, os valores representados são a média das três medidas efetuadas e estão descritos na totalidade no Anexo A4.

Para cada profundidade de corte estão salientados os dois melhores resultados das rugosidades, sendo estes atingidos sempre a velocidades de avanço mais baixas 25 μ m/rot e 12,5 μ m/rot.

Tabela 4.1 Valores de todas as rugosidades medidas em cada espigão.

	Profundidade de corte de 80 μ m				Profundidade de corte de 40 μ m				Profundidade de corte de 20 μ m			
Avanço (μ m/rot)	100	50	25	12,5	100	50	25	12,5	100	50	25	12
Ra	2,70	0,79	0,46	0,33	2,01	0,46	0,32	0,28	1,81	0,40	0,28	0,23
RzD	9,27	3,68	2,47	1,80	8,10	2,49	1,71	1,70	6,61	1,97	1,65	1,24
Rzl	9,42	3,89	2,53	1,97	8,22	2,53	2,01	2,60	6,79	2,20	1,88	1,58
RmD	9,56	4,23	2,86	2,31	8,37	2,81	2,25	3,05	6,91	2,45	2,31	1,61
Rt	9,72	4,37	2,94	2,41	8,49	2,89	2,45	2,27	7,03	2,55	2,14	1,84
Rp	5,34	2,18	1,37	0,99	4,93	1,59	1,00	2,25	3,95	1,43	1,25	0,85
Rpm	5,39	1,88	1,19	0,86	4,70	1,35	0,85	1,03	3,70	1,11	0,86	0,61
Rq	3,51	0,94	0,48	0,42	2,33	0,56	0,39	0,43	2,05	0,48	0,36	0,29
R3z	3,03	2,69	1,62	1,21		1,71	1,13	0,83		1,35	1,11	0,79
Pt	10,70	9,01	5,63	5,53	10,44	5,66	3,88	8,72	9,53	3,95	4,94	3,69
Pc	112,00	154,67	82,67	48,00	85,33	133,33	56,00	26,67	82,67	96,00	45,33	16,00
Sm	89,28	64,69	121,20	217,40	119,30	75,43	181,00	437,50	121,20	108,74	226,17	625,00

Na Tabela 4.2 estão descritos os parâmetros de rugosidades medidos no espigão comercial, estes valores representam a média das três medições descritas no capítulo três, sendo estes os valores de base de comparação entre os espigões maquinados e o comercial. No Anexo A4 estão representadas todas essas medições.

Tabela 4.2 Valores das rugosidades medidas no espigão comercial.

	Espigão Comercial [μm]		
Ra	0,34	Rpm	1,00
RzD	2,52	Rq	0,45
Rzl	2,77	R3z	1,39
RmD	3,22	Pt	3,48
Rt	3,23	Pc	123,67
Rp	1,25	Sm	82,96

4.1.4 Aspeto e perfil de rugosidade

O aspeto da superfície é importante para a caracterização superficial dos espigões maquinados.

Para uma boa comparação *à posteriori*, a Figura 4.3 representa o perfil de rugosidade e o aspeto superficial do espigão comercial.

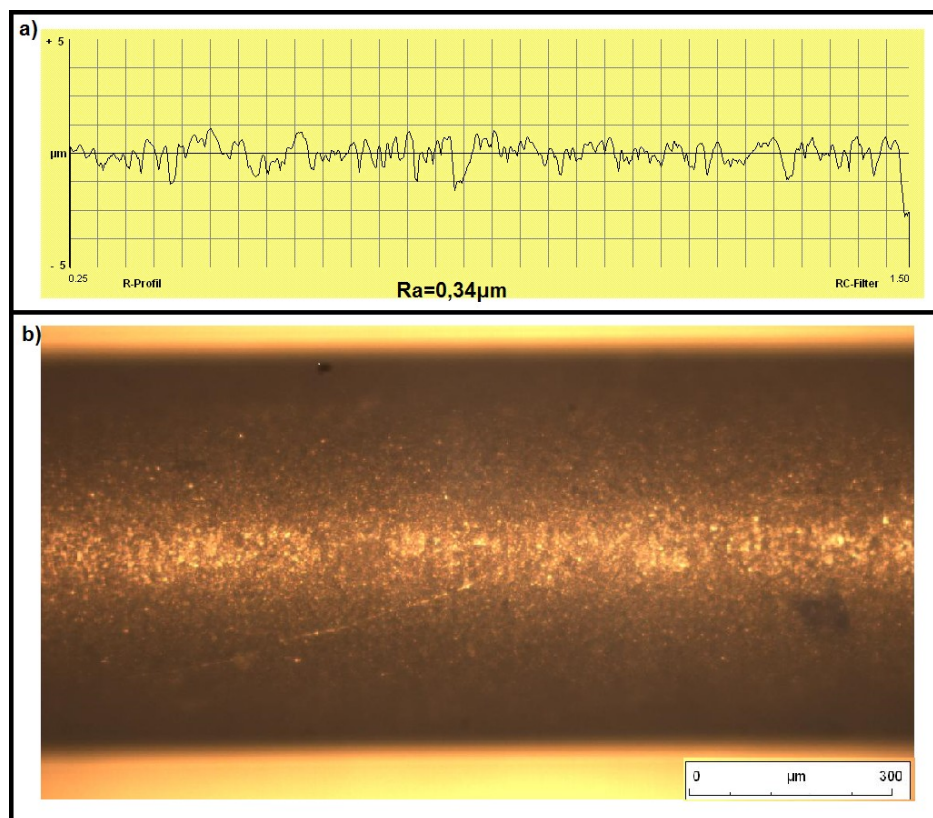


Figura 4.3 a) Perfil de rugosidade e b) aspeto superficial, do espigão comercial.

De referir que o comprimento de palpagem dos perfis de rugosidade apresentados é de 1,5mm (Lt) e um cut-off de 0,25mm.

Na Figura 4.4 estão representados apenas os perfis de rugosidade superficial de três espigões, o primeiro (a) com os parâmetros de maquinagem mais severos $P=80\mu\text{m}$ e $V_a=100\mu\text{m/rot}$, o segundo (b) com $P=40\mu\text{m}$ e $a=50\mu\text{m/rot}$ e por último (c), com os parâmetros de maquinagem menos severos $P=20\mu\text{m}$ e $a=12,5\mu\text{m/rot}$.

Para uma melhor comparação, no Anexo A6 encontram-se todos os doze perfis de rugosidades dos espigões maquinados.

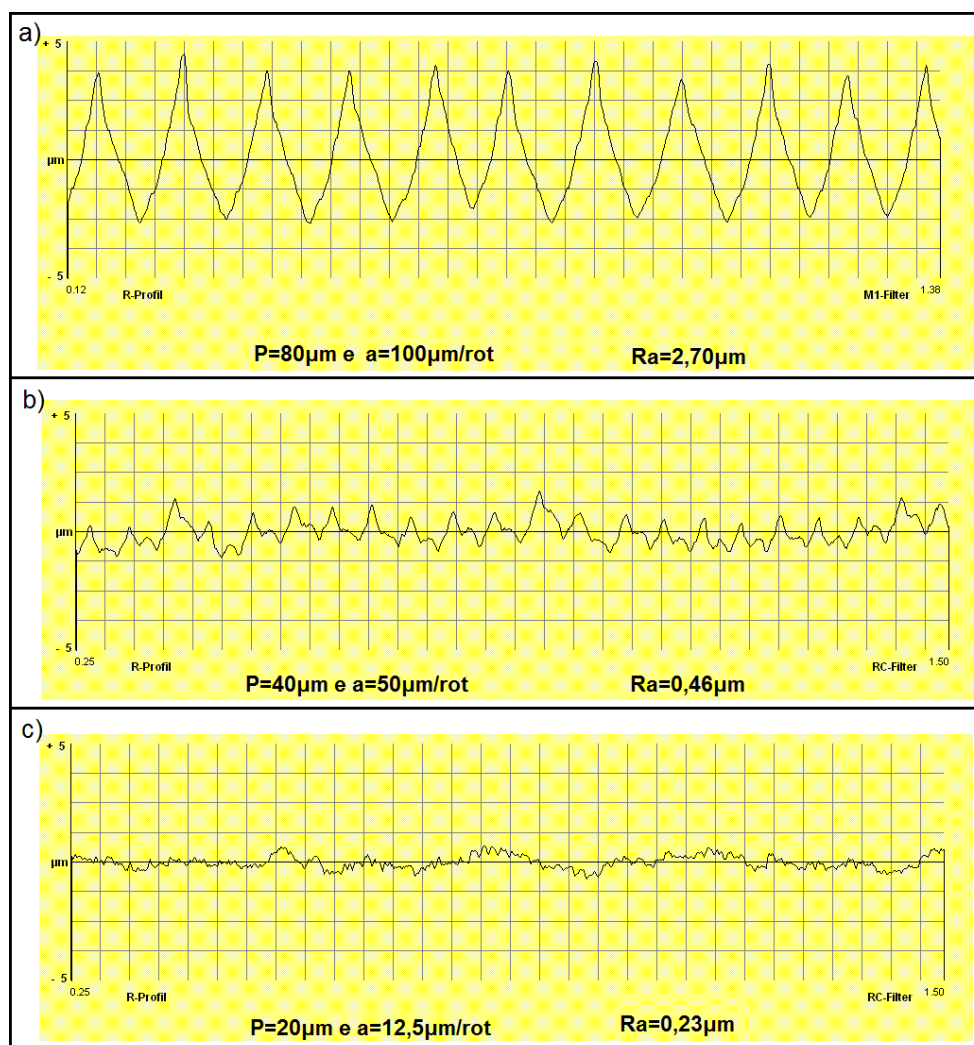


Figura 4.4 Perfis de rugosidades de três espigões dentários.

Estes resultados mostram que, com a diminuição dos parâmetros de corte, as rugosidades obtida diminuem, sendo o avanço o parâmetro que mais influencia nessa diminuição.

Os valores das rugosidades de cada espigão estão tabelados na Tabela 4.1, e pelos perfis apresentados anteriormente denota-se que os melhores perfis de rugosidades superficiais foram obtidos com avanços baixos, entre 25 μ m/rot e 12,5 μ m/rot.

De notar que, todas as medições de rugosidades apresentadas foram medidas no corpo do espigão.

Na Figura 4.5 estão ilustradas as superfícies de cada espigão, obtidas no microscópio ótico. Cada imagem está legendada com os parâmetros de maquinagem empregues e o valor de Ra.

Nota-se que para todos os avanços de 100 μ m/rot a superfície apresenta ondulações, originadas pela passagem da ferramenta de corte no desbaste dos espigões. Estas ondulações vão diminuindo consoante a diminuição da velocidade de avanço. Independentemente do valor da profundidade de corte, verifica-se que, para avanços de 25 μ m/rot e 12,5 μ m/rot os espigões apresentam uma boa qualidade superficial.

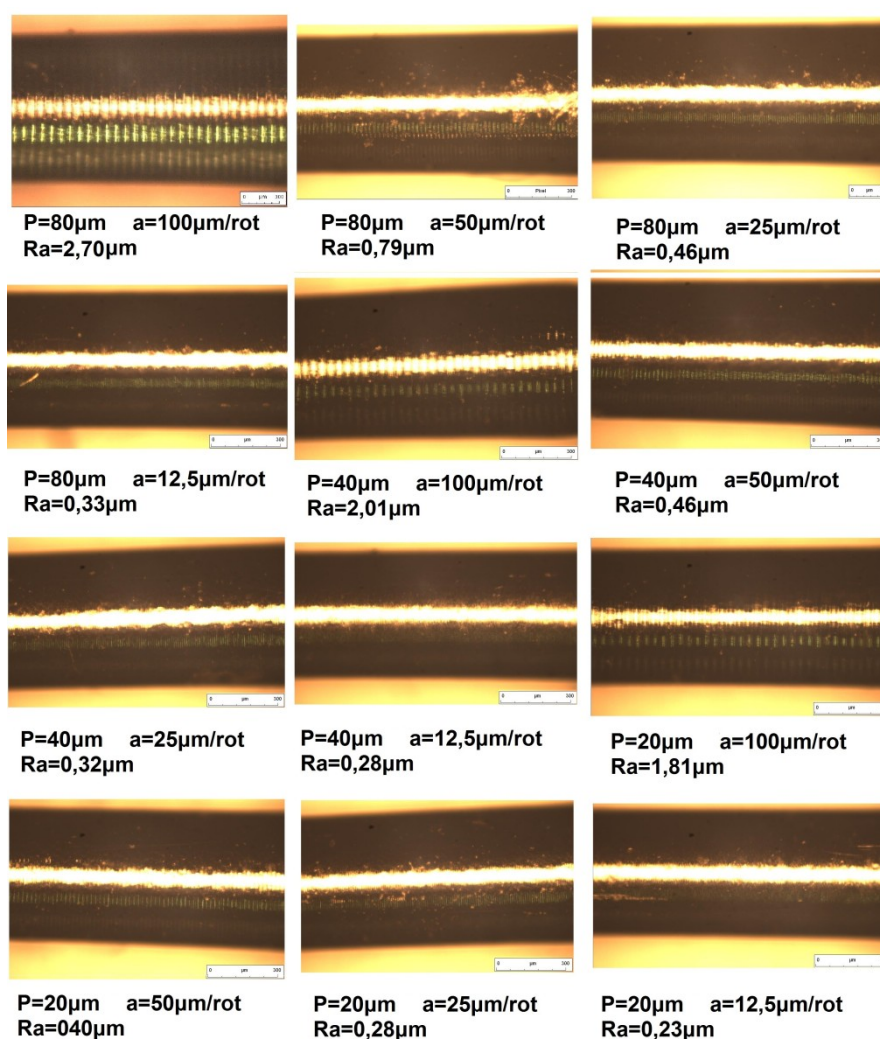


Figura 4.5 Aspeto superficial de todos os espigões maquinados.

4.1.5 Taxa de produção

A taxa de produção (T_p) é definida como o volume de material removido por unidade de tempo e a sua análise tem grande importância nomeadamente numa análise económica. Essa taxa pode ser calculada pela Equação (6), em que S é a secção da apara e V_c a velocidade de corte (Davim et al., 2006).

$$T_p = S * V_c = a * P * V_c$$

Equação (6).

Como a secção da apara (S) é constante, para cada espigão maquinado, a taxa de produção varia linearmente com a velocidade de corte, e como na parte cónica do espigão o diâmetro para maquinar é menor do que na parte do corpo, calculam-se a duas taxas de produção separadamente e posteriormente somam-se. Na parte cónica, o diâmetro utilizado para o cálculo da velocidade de corte é o diâmetro médio do cone. A Tabela 4.3 representa a taxa de produção para cada combinação de parâmetros.

Tabela 4.3 Valores da taxa de produção da maquinagem.

P [μm]	a [μm/rot]	Ra [μm]	$\sum T_p$ [cm ³ /min]
80	100	2,70	0,234
	50	0,79	0,117
	25	0,46	0,058
	12,5	0,33	0,029
40	100	2,01	0,117
	50	0,46	0,058
	25	0,32	0,029
	12,5	0,28	0,015
20	100	1,81	0,058
	50	0,40	0,029
	25	0,28	0,015
	12,5	0,23	0,007

Os cálculos desses valores encontram-se mais detalhados no Anexo A7 deste documento.

Na Figura 4.6 está representada a relação entre a taxa de produção (T_p) e a rugosidade média aritmética (R_a).

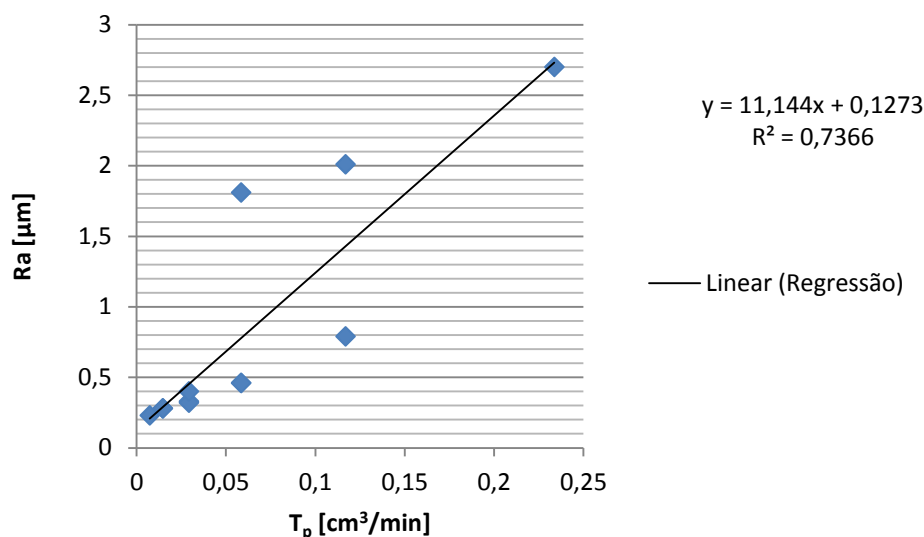


Figura 4.6 Relação entre R_a e T_p .

Em termos de relação direta entre estas duas variáveis, o coeficiente de determinação (R^2) calculado é cerca de 0,74. Isto significa que apenas 26% da variância da regressão não depende das duas variáveis.

O coeficiente de correlação calculado é aproximadamente $R=0,86$, isto mostra forte correlação linear positiva entre estas duas variáveis, ou seja, quando R_a aumenta T_p também aumenta.

4.1.6 Grau de tolerância IT

O grau de tolerância IT não é mais do que um valor adotado para o toleranciamento em construções mecânicas. É representado pelo símbolo IT (tolerância internacional) seguido de um número que representa a sua ordem, desde o grau de maior exatidão (IT01 – grau muito fino), até ao grau de menor exatidão (IT18 – construção grosseira). (Simões Morais.,2006)

Os valores de IT podem ser aproximados pela Equação (7).

$$Ra \cong \frac{IT}{30} \Leftrightarrow IT \cong 30 * Ra$$

Equação (7).

Na Tabela 4.4 encontram-se os valores de IT normalizados. Como neste caso o diâmetro do espigão é de 1,7mm, então o diâmetro nominal escolhido é de 1 a 3mm.

Tabela 4.4 Valores de IT normalizados.

Diâmetro nominal	Tolerâncias em μm														
	IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13
de 1 a 3 mm	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140

Na Tabela 4.5 é calculado o IT de cada espigão, pela equação (7), posteriormente esse valor é aproximado ao valor de IT normalizado e é classificado, consoante a Tabela 4.4. De notar que entre as classes IT5 e IT9 correspondem a uma precisão fina/média e entre IT10 e IT14 uma precisão média/Grosseira.

Tabela 4.5 IT normalizado de cada espigão.

P [μm]	a [$\mu\text{m}/\text{rot}$]	Ra [μm]	IT calculado	IT Normalizado	Classe
80	100	2,70	81	100	IT12
	50	0,79	23,7	25	IT9
	25	0,46	13,8	14	IT8
	12,5	0,33	9,9	10	IT7
40	100	2,01	60,3	60	IT11
	50	0,46	13,8	14	IT8
	25	0,32	9,6	10	IT7
	12,5	0,28	8,4	10	IT7
20	100	1,81	54,3	60	IT11
	50	0,40	12	14	IT8
	25	0,28	8,4	10	IT7
	12,5	0,23	6,9	6	IT6

Na Figura 4.7 está representada a relação de IT com a velocidade de avanço.

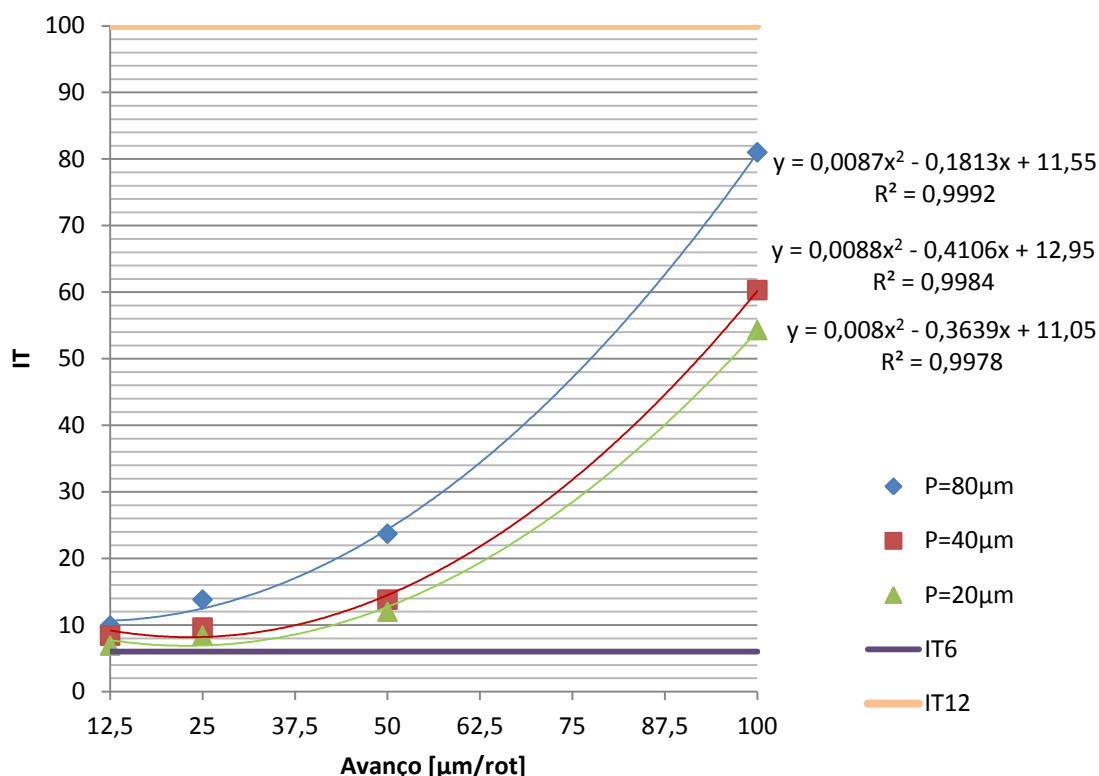


Figura 4.7 Relação entre IT e velocidade de avanço.

Conforme descrito pela literatura, para o processo de torneamento (Simões Morais.,2006), os resultados encontram-se entre IT6 (precisão fina) e IT12 (precisão grosseira), apresentando-se nesse caso mais próximos do intervalo de IT6 a IT9 (precisão fina/média).

As equações das curvas representam um modelo quadrático, estas correspondem respetivamente a cada profundidade de corte, em cima para $P=80\mu m$, no meio para $P=40\mu m$ e por último para $P=20\mu m$. Em termos de relação entre as variáveis estudadas, o coeficiente de determinação (R^2) calculado, tendo em conta todos os casos, é em média aproximadamente de 0,998, por consequente, temos então que 1% da variância da regressão não depende das duas variáveis.

O coeficiente de correlação é aproximadamente $R=0,999$ isto mostra uma forte correlação quadrática positiva entre estas duas variáveis, muito próxima de $R=1$ (relação perfeita), ou seja, quando o avanço aumenta, o IT aumenta quadraticamente.

4.1.7 Classificação da melhor rugosidade média aritmética / IT

Por fim, Na Tabela 4.6 estão exibidos os melhores sete resultados obtidos em termos de melhor Ra, comparando estes ao valor de Ra do espigão comercial. Os melhores resultados observados foram obtidos com uma profundidade de corte de 20 μ m, tanto para um avanço de 12,5 μ m/rot como para 25 μ m/rot.

Tabela 4.6 Classificação dos melhores valores de Ra / IT dos espigões maquinados.

Classificação	P [μ m]	a [μ m/rot]	Ra [μ m]	IT
1º	20	12,5	0,23	IT6
2º	20	25	0,28	IT7
3º	40	12,5	0,28	IT7
4º	40	25	0,32	IT7
5º	80	12,5	0,33	IT7
Espigão Comercial			0,34	IT8
6º	20	50	0,40	IT8
7º	40	50	0,46	IT8

4.2 Análise da Forma Geométrica

A análise de forma geométrica é também um fator importante na análise da qualidade dos espigões.

O efeito de conicidade ocorre sobretudo no torneamento de peças reduzidas, como é o caso da maquinagem dos espigões, este efeito é indesejável e pode alterar as dimensões pretendidas das peças. Na Figura 4.8 pode ser visto o efeito mencionado e os locais onde vão ser medidas as dimensões dos diâmetros dos espigões maquinados, como foi referido anteriormente.

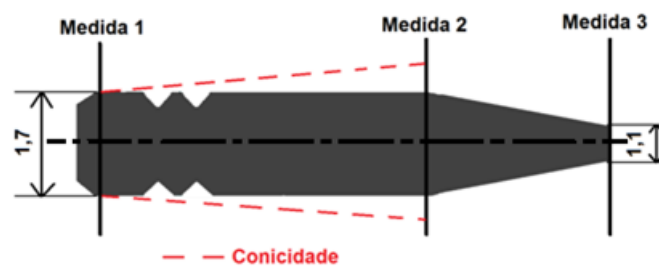


Figura 4.8 Representação da possível conicidade dos espigões.

Nas seguintes figuras (Figura 4.9; Figura 4.10; Figura 4.11) podem ser observadas as variações das medidas do diâmetro e o efeito de conicidade de cada espigão comparadas com as medidas do espigão comercial. Os valores que deram origem a estes resultados estão afixados no Anexo A5.

Profundidade de Corte 80 μ m

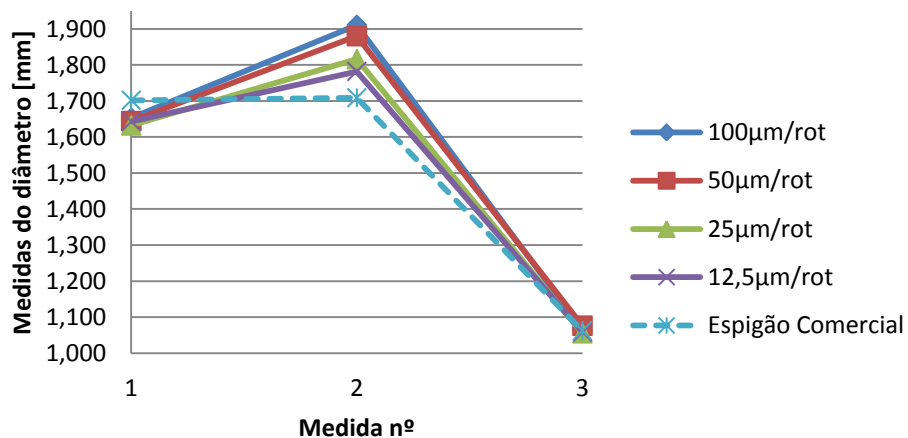


Figura 4.9 Medidas dos diâmetros dos espigões para uma profundidade de corte de 80 μ m.

Profundidade de Corte 40 μ m

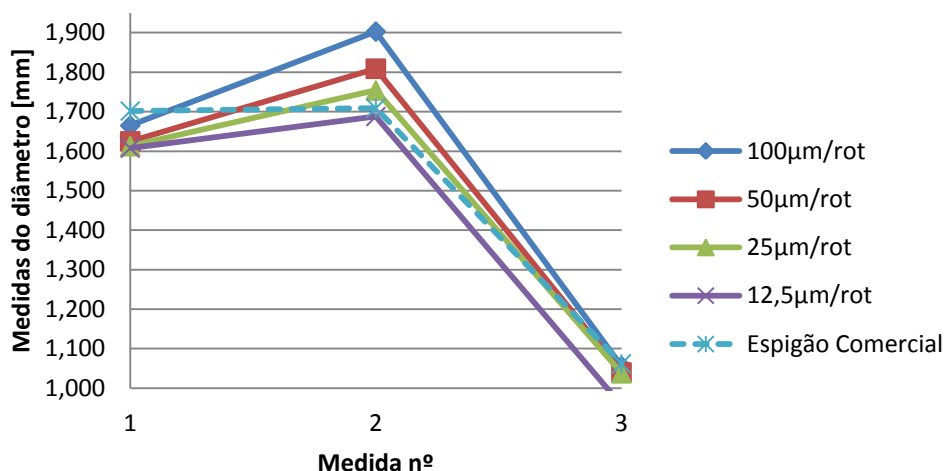


Figura 4.10 Medidas dos diâmetros dos espigões para uma profundidade de corte de 40 μ m.

Profundidade de Corte 20 μ m

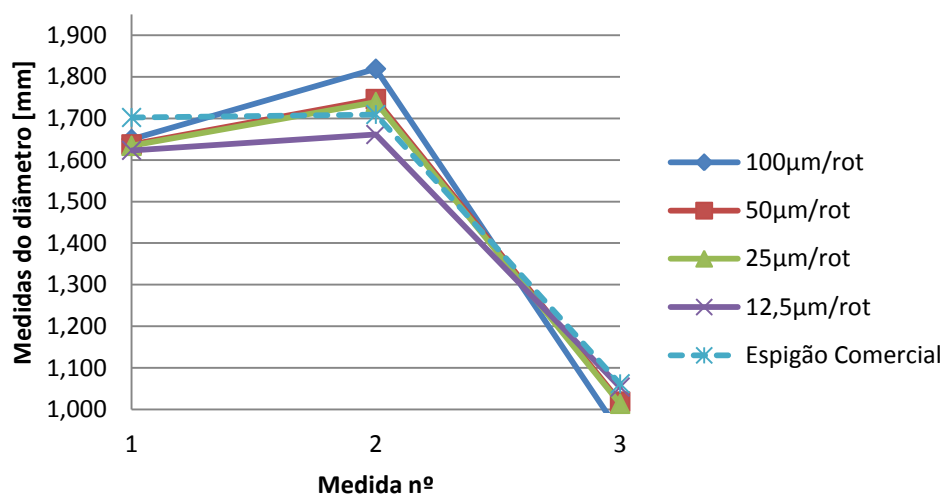


Figura 4.11 Medidas dos diâmetros dos espigões para uma profundidade de corte de 20 μ m.

Verifica-se então que todos os espigões maquinados apresentam efeitos de conicidade.

A diminuição da profundidade de corte diminui este efeito, mas apesar disso, o parâmetro que mais influência no efeito da conicidade é a velocidade de avanço. Independentemente do valor de profundidade de corte, para avanços de 100 μ m/rot e

50µm/rot, verifica-se que o efeito da conicidade é mais visível e as medidas dos diâmetros obtidos afastam-se mais das medidas do diâmetro desejável. Por outro lado para avanços mais baixos, como o de 25µm/rot e 12,5µm/rot o efeito é menor e as medidas dos diâmetros dos espigões são mais próximas.

Para se determinar quais as melhores soluções geométricas e quais as melhores combinações de parâmetros a utilizar é necessário calcular o ângulo β desse declive.

Para tal foi criada a Equação (8) que fornece o valor do ângulo β (Figura 4.12) em função do comprimento (l) dos espigões e da variação dos seus diâmetros (Δd). O comprimento (l) do corpo do espigão é de 11,58mm

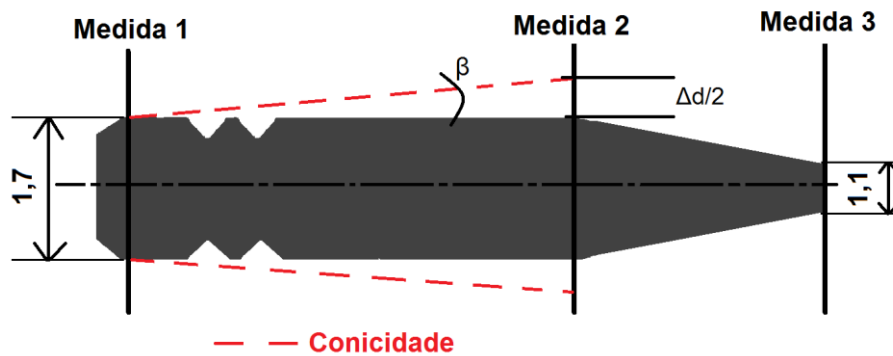


Figura 4.12 Representação do ângulo β .

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\Delta d}{2}}{l} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta d}{2l} \right)$$

Equação. (8)

Da Equação. (8) obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 4.7. Quanto menor o valor do ângulo β melhor é a qualidade dimensional da peça. Estão salientados os dois melhores resultados para cada profundidade de corte. Os valores das medições e dos cálculos para estes resultados estão apresentados no Anexo A5.

Tabela 4.7 Cálculo do ângulo β .

P [μm]	a [$\mu\text{m}/\text{rot}$]	Δd [mm]	β [$^\circ$]
80	100	0,258	0,638
	50	0,236	0,584
	25	0,184	0,455
	12,5	0,139	0,344
40	100	0,238	0,589
	50	0,184	0,455
	25	0,141	0,349
	12,5	0,080	0,198
20	100	0,169	0,418
	50	0,109	0,270
	25	0,105	0,260
	12,5	0,038	0,094
Espigão comercial		0,007	0,017

4.1.1 Classificação da melhor qualidade dimensional.

Em suma, na Tabela 4.8 estão exibidos os melhores 7 resultados obtidos em termos de melhor qualidade dimensional de cada espigão, equiparados estes ao valor do espigão comercial.

Tabela 4.8 Classificação dos espigões segundo a melhor qualidade dimensional obtida.

Classificação	P [μm]	a [$\mu\text{m}/\text{rot}$]	β [$^\circ$]
Espigão comercial			0,017
1 $^\circ$	20	12,5	0,094
2 $^\circ$	40	12,5	0,198
3 $^\circ$	20	25	0,260
4 $^\circ$	20	50	0,270
5 $^\circ$	80	12,5	0,344
6 $^\circ$	40	25	0,349
7 $^\circ$	20	100	0,418

Os melhores resultados observados foram obtidos com uma profundidade de corte de 20 μm e 40 μm , ambos para um avanço de 12,5 $\mu\text{m}/\text{rot}$.

4.3 Tempo de maquinagem

O tempo de maquinagem é um fator importante, nomeadamente em termos económicos.

Na Tabela 4.9 estão representados os tempos de maquinagem para cada espigão, de salientar que estes resultados foram tirados a partir de um cronómetro digital. Para efeito de estudo, esse tempo foi medido a partir do diâmetro de 3mm da barra, como foi referido anteriormente. Na mesma Tabela 4.9 estão descritos os tempos teóricos de corte (T_c), calculados a partir da Equação. (9), em que L_t representa o comprimento percorrido pela ferramenta no avanço de trabalho em mm e a_t o avanço em mm/min. No Anexo A8 encontra-se mais detalhado o cálculo de T_c .

$$T_c = \frac{L_t}{a_t} = \frac{L_t}{a \cdot n}$$

Equação. (9)

Tabela 4.9 Tempos de maquinagem de todos os espigões.

P [μ m]	80	80	80	80	40	40	40	40	20	20	20	20
a [μ m/rot]	100	50	25	12,5	100	50	25	12,5	100	50	25	12,5
Tempo de Maquinagem [min]	1,88	3,37	4,45	9,18	3,22	6,30	9,32	17,82	5,45	10,03	17,78	33,45
Tempo de Corte Teórico (T_c) [min]	0,52	1,03	2,07	4,13	1,03	2,07	4,13	8,26	2,07	4,13	8,26	16,53

Verifica-se que, T_c apresenta valores menores do que o tempo de maquinagem medido pelo cronómetro. Isto deve-se ao fato de, no cálculo de T_c não estarem contabilizados o tempo de posicionamento da ferramenta e o tempo de recuo desta no fim da cada passagem. Este valor traduz apenas o tempo efetivo de corte. O tempo de maquinagem (Tempo total) é o tempo usado nas próximas observações.

Nas figuras que se seguem é apresentada a correlação entre o tempo de maquinagem e as variáveis já estudadas, como R_a e o ângulo de conicidade β dos espigões.

Primeiramente relacionou-se o efeito conicidade, ou seja, o ângulo β com o tempo de maquinagem, para as três diferentes profundidades de corte, $P=80\mu\text{m}$ (Figura 4.13), $P=40\mu\text{m}$ (Figura 4.14) e $P=20\mu\text{m}$ (Figura 4.15).

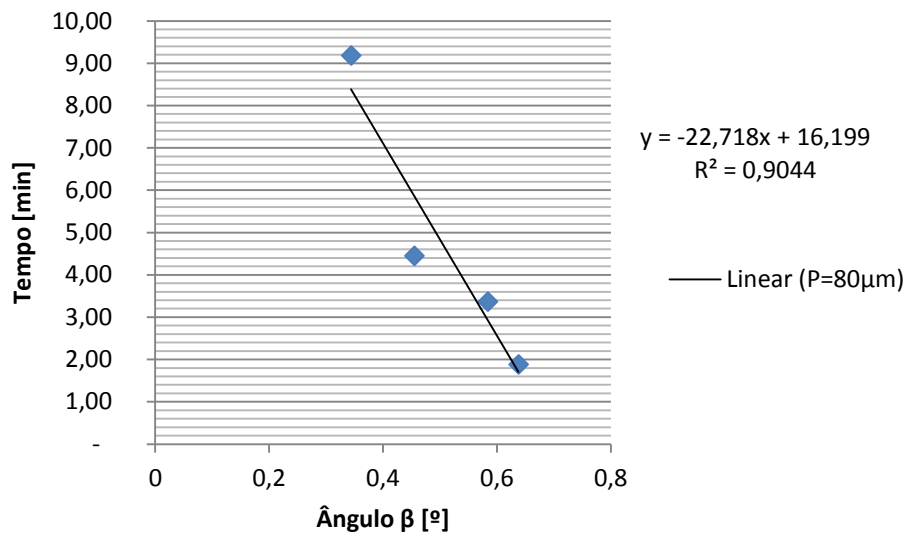


Figura 4.13 Relação entre o tempo de maquinagem e o ângulo β , para $P=80\mu\text{m}$.

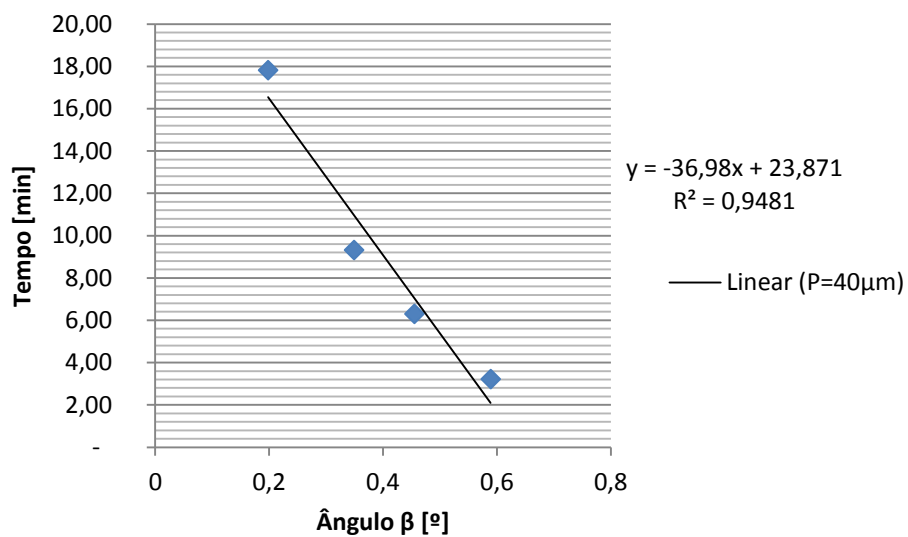


Figura 4.14 Relação entre o tempo de maquinagem e o ângulo β , para $P=40\mu\text{m}$.

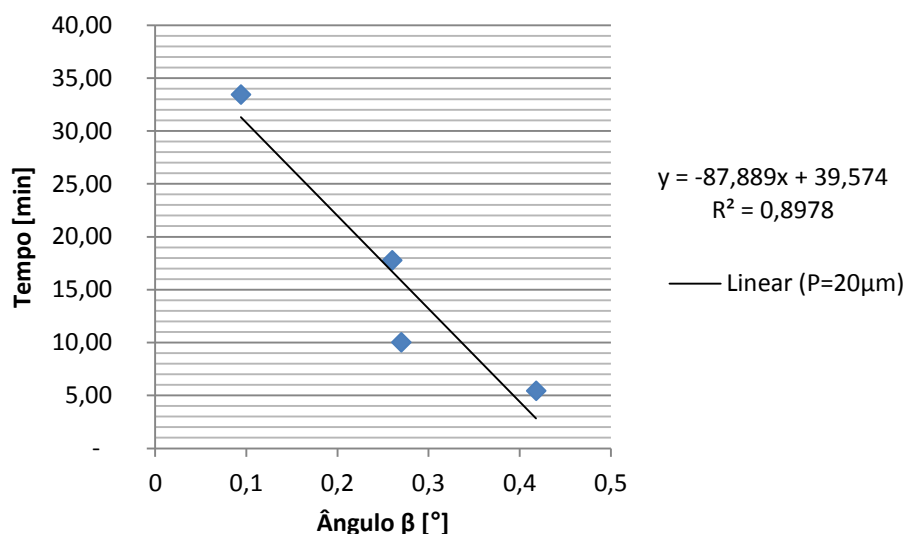


Figura 4.15 Relação entre o tempo de maquinagem e o ângulo β , para $P=20\mu\text{m}$.

Para os três casos, verifica-se que existe uma relação linear entre estas duas variáveis. Essa relação é descrita pelas equações que compõem as três imagens, em que a variável y representa o tempo em minutos e a variável x representa o ângulo β em graus Celcius. De referir também que, o coeficiente de determinação (R^2) para os três casos em média é aproximadamente de 0,92, ou seja, apenas 8% da variância da regressão não depende das duas variáveis. O fator de correlação (R) para os três casos (média) é aproximadamente de -0,96, traduzindo-se este numa forte relação linear negativa entre o tempo de maquinagem e o ângulo β , ou seja, consoante a diminuição do tempo de maquinagem, maior vai ser o ângulo de conicidade do espigão.

De seguida relaciona-se a rugosidade média aritmética (R_a) com o tempo de maquinagem (T), para as três diferentes profundidades de corte, $P=80\mu\text{m}$ (Figura 4.16), $P=40\mu\text{m}$ (Figura 4.17) e $P=20\mu\text{m}$ (Figura 4.18).

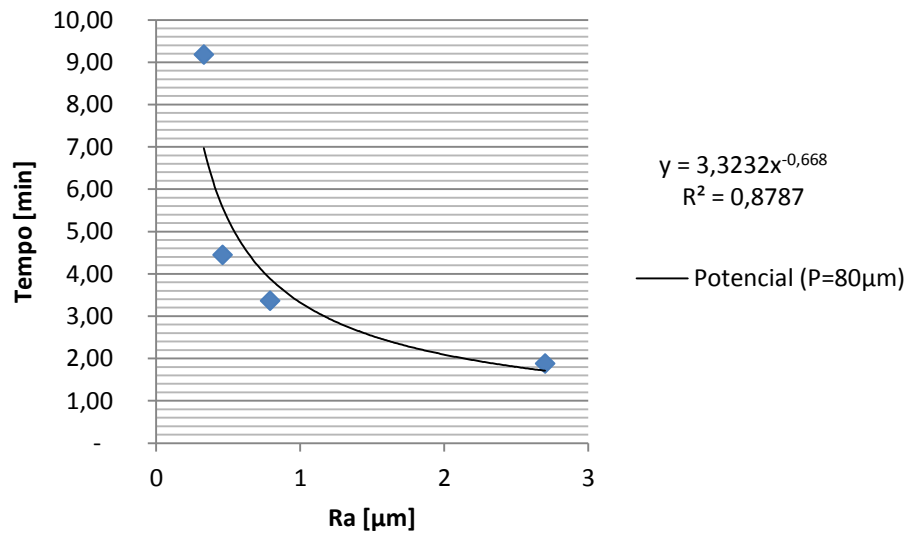


Figura 4.16 Relação entre o tempo de maquinagem e Ra, para P=80 μm .

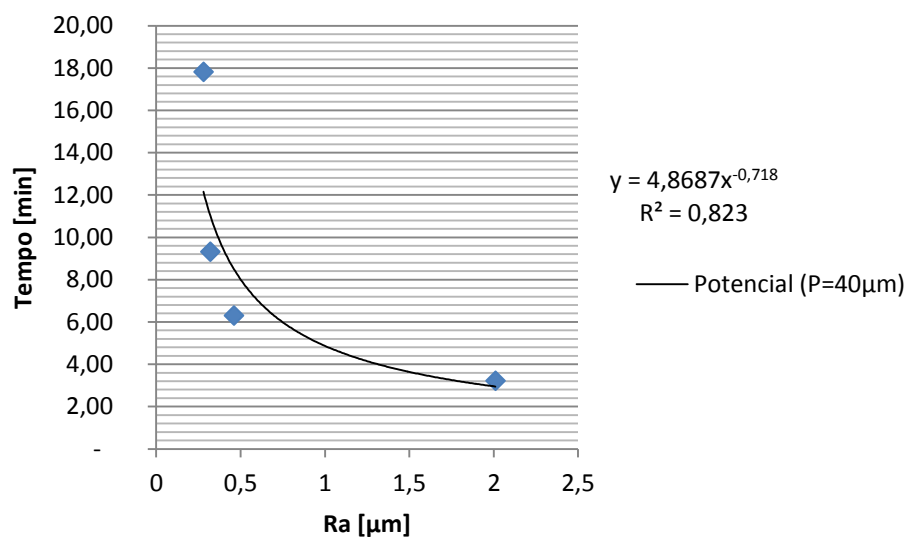


Figura 4.17 Relação entre o tempo de maquinagem e Ra, para P=40 μm .

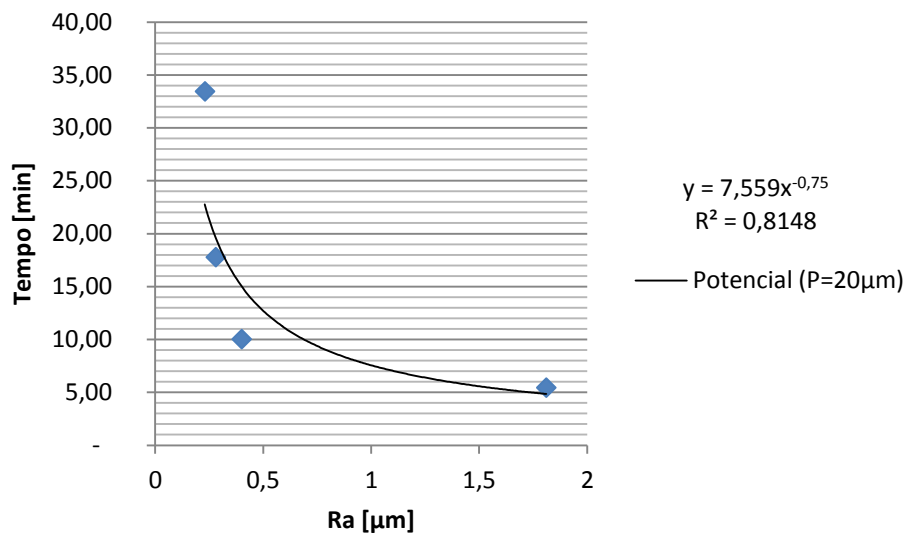


Figura 4.18 Relação entre o tempo de maquinagem e Ra, para P=20μm.

Desde logo nota-se que a relação entre estas duas variáveis não é linear, pelo que teve-se de utilizar um modelo do tipo potencial. Com este tipo de regressão, as duas variáveis em causa apresentam uma boa relação negativa, sendo assim, quando o tempo de maquinagem é grande o valor de Ra é pequeno, diminuindo potencialmente consoante a diminuição do tempo de maquinagem. O coeficiente de determinação (R^2) encontra-se na ordem dos 0,84 (valor médio), simbolizando isto que apenas 16% da variância desta regressão não depende das variáveis em causa. O coeficiente de correlação (R) encontra-se na ordem dos -0,92 (valor médio). Nas equações apresentadas, y representa o tempo em minutos e x representa a rugosidade média aritmética (Ra).

4.3.1 Classificação de melhor tempo

Por fim a Tabela 4.10 mostra por ordem decrescente a classificação do tempo de maquinagem para cada espigão.

Tabela 4.10 Classificação dos espigões segundo o tempo mais rápido de maquinagem.

Classificação	P [μm]	a [$\mu\text{m}/\text{rot}$]	Tempo [min]
1º	80	100	1,88
2º	40	100	3,22
3º	80	50	3,37
4º	80	25	4,45
5º	20	100	5,45
6º	40	50	6,30
7º	80	12,5	9,18
8º	40	25	9,32
9º	20	50	10,03
10º	20	25	17,78
11º	40	12,5	17,82
12º	20	12,5	33,45

4.4 Comparação Entre os Espigões Maquinados e o Espigão Comercial (Dentoclic®)

Em termo de comparação entre os espigões maquinados e o espigão comercial, o Ra dos espigões maquinados aproxima-se do valor de Ra do espigão comercial para as combinações de corte ilustradas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Valores de Ra dos espigões maquinados que mais se aproximam do valor de Ra do espigão comercial.

P [μm]	a [$\mu\text{m}/\text{rot}$]	Ra Maquinado [μm]	Ra Comercial [μm]
80	12,5	0,33	0,34
40	25	0,32	0,34
40	12,5	0,28	0,34
20	50	0,40	0,34
20	25	0,28	0,34

De notar que o Ra dos espigões maquinados aumenta para valores de parâmetros de corte maiores (profundidades de corte e avanços maiores) e diminui para valores de parâmetros de corte menores (profundidades de corte e avanços menores), em relação aos apresentados na Tabela 4.11.

Em termos da conicidade, os espigões maquinados que mais se aproximam dos valores β do espigão comercial estão representados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Valores β dos espigões maquinados que mais se aproximam do valor β do espigão comercial.

P [μm]	a [$\mu\text{m}/\text{rot}$]	β Maquinado [$^\circ$]	β Comercial [$^\circ$]
80	12,5	0,344	0,017
40	12,5	0,198	0,017
20	50	0,270	0,017
20	25	0,260	0,017
20	12,5	0,094	0,017

Verifica-se então que, apenas para baixas profundidades de corte e baixas velocidades de corte é que se nota uma aproximação ao valor do angulo β do espigão comercial, nomeadamente para profundidades de corte de $20\mu\text{m}$ e avanços de $12,5\mu\text{m}/\text{rot}$. Ao aumentar esses dois parâmetros, o ângulo de conicidade β vai também aumentar.

Na Figura 4.19 estão representados os doze espigões maquinados, em que cada linha corresponde a uma profundidade de corte e cada coluna a uma velocidade de corte diferente, o parâmetro profundidade de corte decresce (80-40- $20\mu\text{m}$) e a velocidade decresce da esquerda para a direita (100-50-25- $12,5\mu\text{m}$).



Figura 4.19 Conjunto dos doze espigões maquinados.

4.5 Exemplos de Escolhas de Espigões Personalizados

Após a análise de todos os resultados apresentados neste capítulo pode-se agora propor a escolha de um espigão dentário personalizado, consoante as especificações do médico dentista.

Para otimizar e personalizar essa escolha foi proposta a Equação. (10) (função objetivo) (Davim, et al., 2001) que considera a rugosidade média aritmética (Ra), a amplitude da rugosidade (Rt), o ângulo de conicidade (β) e o tempo de maquinagem (T).

$$f = C_1 \frac{Ra}{Ra_{max}} + C_2 \frac{Rt}{Rt_{max}} + C_3 \frac{\beta}{\beta_{max}} + C_4 \frac{T}{T_{max}}$$

Equação. (10)

De referir que, na Equação (10) os divisores são os maiores valores obtidos para o respetivo parâmetro e os dividendos os valores medidos para cada espigão em concreto. Os coeficientes C_i (i de 1 a 4) representam o peso das parcelas para cada variável de escolha.

A escolha do espigão é influenciada através do grau de importância dado aos valores de C_i , por esse fator vão ser apresentados três exemplos de escolha, variando o grau de importância (C_i).

No Anexo A9 encontram-se as tabelas detalhadas do cálculo da função (f) para os três exemplos descritos.

4.5.1 Primeiro exemplo

Para este exemplo de escolha deu-se maior peso ao tempo de maquinagem na produção dos espigões maquinados. Se as especificações do médico dentista forem um espigão com o mesmo *design* proposto ao deste trabalho e um valor de Ra o menor possível, não podendo este ultrapassar por exemplo os $0,50\mu m$. Sendo que,

nesta escolha o tempo de maquinagem é o fator mais importante, ou seja, obter um espigão com o menor tempo de maquinagem possível, garantindo-se as especificações do médico dentista. Os valores de C_i para estas especificações estão representados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 Valores das constantes para o primeiro exemplo.

Parâmetros	Constante	Valor atribuído
Amplitudes	C_1, C_2	0,20
Forma	C_3	0,10
Tempo de Maquinagem	C_4	0,5
	$\sum_{i=1}^4 C_i$	1

A Tabela 4.14 demonstra o valor da função (f) para os valores de C_i mencionados na tabela anterior. O espigão que mais se aproxima das especificações é o que apresenta menor valor da função (f), este encontra-se salientado.

Tabela 4.14 Cálculo do fator (f) para o primeiro exemplo.

P [μm]	a [μm/rot]	Ra [μm]	Rt [μm]	β [°]	Tempo de Maquinagem [min]	f
80	100	2,70	9,44	0,638	1,88	0,528
	50	0,79	4,37	0,584	3,37	0,293
	25	0,46	2,94	0,455	4,45	0,234
	12,5	0,33	2,31	0,344	9,18	0,265
40	100	2,01	8,49	0,589	3,22	0,469
	50	0,46	2,89	0,455	6,30	0,261
	25	0,32	2,25	0,349	9,32	0,265
	12,5	0,28	3,18	0,198	17,82	0,386
20	100	1,81	7,03	0,418	5,45	0,430
	50	0,40	2,55	0,270	10,03	0,276
	25	0,28	2,34	0,260	17,78	0,377
	12,5	0,23	1,84	0,094	33,45	0,571

Portanto o espigão mais próximo para este tipo de escolha é o espigão maquinado com uma profundidade de corte (P) de 80μm e uma velocidade de avanço (Va) de 25μm/rot.

4.5.2 Segundo exemplo

Para o segundo exemplo de escolha deu-se maior peso à rugosidade da superfície dos espigões maquinados. Se as especificações do médico dentista forem um espigão com o mesmo *design* proposto ao deste trabalho e um valor de Ra o menor possível, não podendo este ultrapassar por exemplo os 0,50µm. Para este efeito, os valores de C_i estão representados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 Valores das constantes para o segundo exemplo.

Parâmetros	Constante	Valor atribuído
Amplitudes	C_1, C_2	0,35
Forma	C_3	0,1
Tempo de Maquinagem	C_4	0,2
	$\sum_{i=1}^4 C_i$	1

A Tabela 4.16 demonstra o valor da função (f) para os valores de C_i mencionados na tabela anterior. O espigão que mais se aproxima das especificações é o que apresenta menor valor da função (f), encontrando-se este salientado.

Tabela 4.16 Cálculo do fator (f) para o segundo exemplo.

P [µm]	a [µm/rot]	Ra [µm]	Rt [µm]	β [°]	Tempo de Maquinagem [min]	f
80	100	2,70	9,44	0,638	1,88	0,811
	50	0,79	4,37	0,584	3,37	0,376
	25	0,46	2,94	0,455	4,45	0,267
	12,5	0,33	2,31	0,344	9,18	0,237
40	100	2,01	8,49	0,589	3,22	0,687
	50	0,46	2,89	0,455	6,30	0,276
	25	0,32	2,25	0,349	9,32	0,235
	12,5	0,28	3,18	0,198	17,82	0,292
20	100	1,81	7,03	0,418	5,45	0,593
	50	0,40	2,55	0,270	10,03	0,249
	25	0,28	2,34	0,260	17,78	0,270
	12,5	0,23	1,84	0,094	33,45	0,313

Neste caso o espigão maquinado mais próximo para este tipo de escolha é o espigão que apresenta o menor o valor da função (f). Este é obtido com uma profundidade de corte (P) de 40µm e uma velocidade de avanço (Va) de 25µm/rot.

4.5.3 Terceiro exemplo

Por fim se o médico dentista for mais específico nas exigências do espigão dentário. Este com um valor de Ra, por exemplo, entre 0,40µm e 0,50µm. Neste caso os fatores tempo de maquinagem e ângulo de conicidade podem ser retirados da equação. Os valores de C_i encontram-se apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 Valores das constantes para o terceiro exemplo.

Parâmetros	Constante	Valor atribuído
Amplitudes	C_1, C_2	0,50
Forma	C_3	0
Tempo de Maquinagem	C_4	0
	$\sum_{i=1}^4 C_i$	1

A Tabela 4.18 representa o valor da função (f) para os valores de C_i citados na tabela anterior. O espigão que mais se aproxima das especificações é o que está salientado.

Tabela 4.18 Cálculo do fator (f) para o terceiro exemplo.

P [µm]	a [µm/rot]	Ra [µm]	Rt [µm]	f
80	100	2,7	9,44	1,000
	50	0,79	4,37	0,378
	25	0,46	2,94	0,241
	12,5	0,33	2,31	0,183
40	100	2,01	8,49	0,822
	50	0,46	2,89	0,238
	25	0,32	2,25	0,178
	12,5	0,28	3,18	0,220
20	100	1,81	7,03	0,708
	50	0,4	2,55	0,209
	25	0,28	2,34	0,176
	12,5	0,23	1,84	0,140
Espigão especificado		0,45	3,00	0,242

Neste ultimo caso, é necessário também calcular o valor da função (f) para o espigão especificado, pelo médico dentista e comparar este ao valor da função (f) dos espigões maquinados, escolhendo-se o espigão maquinado com o valor mais próximo ao valor do espigão especificado.

O espigão que apresenta o valor da função (f) mais próximo é o espigão maquinado com uma profundidade de corte (P) de $80\mu\text{m}$ e uma velocidade de avanço (V_a) de $25\mu\text{m/rot}$.

Assim sendo, a escolha do melhor espigão ou do espigão que mais se aproxima das características do espigão especificado pelo médico dentista, varia consoante o peso dado aos valores de cada fator C_i .

Por fim, de realçar que um torno CNC convencional pode maquinar na escala de microtorneamento, com boa qualidade superficial, garantindo a adequada precisão.

5. Conclusões

A presente dissertação pretendeu apresentar uma contribuição para o estudo do fabrico de espigões dentários em titânio.

Verificou-se que é possível o projeto/fabrico de espigões dentários personalizados com diferentes rugosidades, pelo processo de microtorneamento num torno CNC convencional, garantindo-se alguma precisão geométrica e dimensional. Sendo necessário um estudo prévio da estratégia de maquinagem, da ferramenta de corte e dos parâmetros de corte a utilizar.

O efeito da rugosidade superficial dos espigões dentários é dos fatores mais importantes num bom desempenho e no sucesso a longo prazo deste tipo de prótese dentária. Conseguiu-se fabricar doze espigões dentários personalizados, estes com valores de R_a entre $2,70\mu\text{m}$ e $0,23\mu\text{m}$ e valores de IT entre IT12 e IT06.

Para fazer este tipo de operações, verificou-se que os melhores parâmetros de corte são os mais baixos (baixas profundidades de corte e avanços reduzidos), estes geram espigões com melhor qualidade superficial e dimensional. Neste caso, o espigão maquinado com a menor rugosidade e com o menor efeito de conicidade foi o espigão com uma profundidade de corte de $20\mu\text{m}$ e uma velocidade de avanço de $12,5\mu\text{m/rot}$. Pode-se também concluir que no processo de microtorneamento, em diâmetros reduzidos é difícil de evitar o efeito de conicidade.

Em relação aos valores de rugosidade e efeito de conicidade do espigão comercial, os espigões maquinados apresentam idêntico valor entre as combinações de $P=40$ a $25\mu\text{m}$ e $a=50$ a $25\mu\text{m/rot}$. Para valores diferentes desse intervalo, consegue-se fabricar espigões com diferentes valores de rugosidades em relação ao espigão comercial.

Em termos dimensionais, com esta estratégia de maquinagem mostrou-se ser possível personalizar o *design* dos espigões dentários, de acordo com as recomendações do médico dentista, tais como, o comprimento, o diâmetro e o ângulo da parte cônica.

5.1 Proposta de Trabalhos Futuros

Após esta investigação na área do fabrico de espigões dentários são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros:

- Utilizar outras estratégias de maquinagem no fabrico dos espigões, como por exemplo, alterar o tipo de ferramenta e variar os parâmetros de maquinagem.
- Estudar o fabrico de espigões em outros materiais, como por exemplo: os compósitos reforçados com fibras de vidro (fibras de vidro unidireccionais em que a matriz é resina epóxica).
- Comparar o efeito da rugosidade e analisar a viabilidade do projeto/fabrico de espigões dentários personalizados para a aplicação médica em situações reais.
- Analisar técnicas de acabamento superficial e a rugosidade obtida.

6. Referências

Adair. K; Shiv G. Kapoor e Richard E. DeVor (2011) *Development of a unique topology for a hard-turning micro-scale machine tool*. Journal of Manufacturing Processes, Volume 13, Issue 2, August 2011, Pages 75-84

Alberto Caballero-Ruiz; Leopoldo Ruiz-Huerta e Tatiana Baidyk, Ernst Kussul (2007) *Geometrical error analysis of a CNC micro-machine tool*. Mechatronics, Volume 17, Issues 4–5, May–June 2007, Pages 231-243.

Ali Balbosh; Klaus Ludwig e Matthias Kern. (2005) *Comparison of titanium dowel retention using four different luting agents*. The Journal of Prosthetic Dentistry, Volume 94, Issue 3, September 2005, Pages 227-233

Andrea F.V. Santos, Carina B. Tanaka, Raul G. Lima, Camila O.M. Espósito, Rafael Y. Ballester, Roberto R. Braga, Josete B.C. Meira (2009). *Vertical Root Fracture in Upper Premolars with Endodontic Posts: Finite Element Analysis*. Original Research Article, Journal of Endodontics, Volume 35, Issue 1, January 2009, Pages 117-120

Asad A.B.M.A.; Takeshi Masaki; Rahma M.; Lim H.S. e Wong Y.S. (2007) *Tool-based micro-machining* Journal of Materials Processing Technology, Volumes 192–193, 1 October 2007, Pages 204-211.

Azizur Rahman M.; Rahman M.; A. Senthil Kumar e Lim H.S. (2005) *CNC microturning: an application to miniaturization* Article International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 45, Issue 6, May 2005, Pages 631-639.

Chae J.; Park S.S. e Freiheit T. (2006) *Investigation of micro-cutting operations* Original Research Article. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issues 3–4, March 2006, Pages 313-332.

Cheung W. (2005) *A review of the management of endodontically treated teeth: Post, core and the final restoration.* Journal of the American Dental Association, 136(5), pp. 611-619, 2005.

Chi-Wei Ni; Chih-Han Chang; Terry Yuan-Fang Chen e Shu-Fen Chuang. (2011) A multiparametric evaluation of post-restored teeth with simulated bone loss, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Volume 4, Issue 3, April 2011, Pages 322-330.*

D.M. Brunette; P. Tengvall; Marcus Textor; P. Thomsen (2001) *Titanium in Medicine: Material Science, Surface Science, Engineering, Biological Responses and Medical Applications.* Springer-Verlag Berling Heidelber 2011, Printed in Germany, pp VII-X and 771-875.

Davim, J.P e Correia, A.E. (2006) *Maquinagem a Alta Velocidade-Fresagem/CNC.* Publindústria, Edições Técnicas; Impressão Publidisa, junho 2007; pp 54-56.

De Castro, R.; De Abreu Polleto, L. T. (2003) *Stress analysis of an upper central incisor restored with different posts.* Journal of Oral Rehabilitation, Volume 30, 2003, Pages 936-942.

Dominic A. Stewardson; Adrian C. Shortall e Peter M. Marquis. (2010) The effect of clinically relevant thermocycling on the flexural properties of endodontic post material, *Journal of Dentistry, Volume 38, Issue 5, May 2010, Pages 437-442.*

Dominic A. Stewardson; Adrian C. Shortall; Peter M. Marquis e Philip J. Lumley (2010) *The flexural properties of endodontic post materials.* Dental Materials, Volume 26, Issue 8, August 2010, Pages 730-736.

Fernades, A. S.; Shwttty, S. e Coutinho, I. (2003). Factors determining post selection: A literature review, *Journal of Prosthetic Dentistry, 90(6), pp. 556-562.*

Gianluca Plotino; Nicola M. Grande; Rossella Bedini; Cornelis H. Pameijer e Francesco Somma. (2007) Flexural properties of endodontic posts and human root dentin, *Dental Materials, Volume 23, Issue 9, September 2007, Pages 1129-1135.*

Grieznis, L.; Apse, P. e Soboleva, U. (2006). The effect of 2 different diameter cast posts on tooth root fracture resistance in vitro, *Stomatologija, Baltic Dental and Maxillofacial. Journal, 8:30-2 pp. 30-32.*

Isil Cekic-Nagas, Elcin Sukuroglu, Senay Canay (2011) *Does the surface treatment affect the bond strength of various fibre-post systems to resin-core materials?* Original

Research Article Journal of Dentistry, Volume 39, Issue 2, February 2011, Pages 171-179

J.Paulo Davim, C.A. Conceição António (2001) *Optimisation of cutting conditions in machining of aluminium matrix composites using a numerical and experimental model.* Journal of Materials Processing Technology, Volume 112, Issue 1, 3 May 2001, Pages 78-82

Ji-Hyun Jang; Su-Jung Park; Kyung-San Min; Bin-Na Lee; Hoon-Sang Chang; Won-Mann Oh; Hyunpil Lim; Young-Tae Cho; Jeong-Tae Koh; Ho-Hyun Son; Yun-Chan Hwang e In-Nam Hwang. (2012) Stress behavior of cemented fiber-reinforced composite and titanium posts in the upper central incisor according to the post length: Two-dimensional finite element analysis, *Journal of Dental Sciences*, Available online 20 November 2012.

Kai Egashira; Mitsuo Iwata e Yosuke Nomura (2011) *Boring and face grooving using micro turning* CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 60, Issue 1, 2011, Pages 81-84.

Kai Egashira; Mitsuo Iwata e Yosuke Nomura (2011) *Boring and face grooving using micro turning tools.* CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 60, Issue 1, 2011, Pages 81-84.

Leles C. R.; Souza J. B. e Busato A. L (2004) *Princípios Das Restaurações Com Retenção Intra_Raducluar.* Ciência Endodôntica. São Paulo, Editora Artes Médias Ltda, pp 991-1006, 2004.

Leonardo; Mario Roberto. (2005) Endodontia: tratamento de canais radiculares: princípios técnicos e biológicos, *Mário Roberto Leonardo - São Paulo: Artes Médicas, 2005.*

Li LL.; Wang Z.Y.; Bai Z.C.; Mao Y.; Gao B.; Xin H.T.; Zhou B.; Zhang Y. e Liu B. (2006). Three-dimensional finite element analysis of weakened roots restored with different cements in combination with titanium alloy posts. *Chin. Med. J.* 2006;119;4.

Lim H.S.; Rahman M.; Neo K.S.; Senthil Kumar A.; Wong Y.S. e Li X.P. (2007) *Tool-based nanofinishing and micromachining.* Journal of Materials Processing Technology, Volume 185, Issues 1–3, 30 April 2007, Pages 2-16.

M. Rahman, A.B.M.A. Asad, T. Masaki, T. Saleh, Y.S. Wong, A Senthil Kumar (2010) *A multiprocess machine tool for compound micromachining,* International

Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 50, Issue 4, April 2010, pp 344-356.

Mahmound, K. A.; Ahmad, A. M.; Mohammad, R. R. e Osama, A. (2010). Fracture Resistance of Teeth Restored with Post-retained Restorations: An Overview, *Journal of Endodontics*, Volume 36, Number 9, September 2010, pp.1439-1449.

Mamat, A. e Rosli, M. A. (2009) Development and Analysis of Taper Tool Path for Micro Turing Operation, *CCSE Journal*, Volume 3, No.1, January 2009, pages 176-186.

Mattos C.M.A.; Las Casas E.B.; Dutra I.G.R.; Sousa H.A. e Guerra S.M.G. (2012) Numerical analysis of the biomechanical behaviour of a weakened root after adhesive reconstruction and post-core rehabilitation Original Research Article. *Journal of Dentistry*, Volume 40, Issue 5, May 2012, Pages 423-432

Menani, L. R.; Ribeiro, R. F. e Almeida Antunes, R. P. (2008). Tensile bond strength of cast commercially pure titanium and cast gold-alloy posts and cores cemented with two luting agents, *The Journal of Prosthetic Dentistry*, Volume 99, Issue 2, February 2008, pp.141-147.

Mera C. Michael; Adam Husein; Wan Z. W. Bakar e Eshamsul Sulaiman. (2010) Fracture resistance of endodontically treated teeth: an in vitro study, *Archives of Orofacial Sciences* (2010), 5(2): 36-41.

Mou Y.B.; Chen Y.M.; Smales R.j. e Yip K.h. (2009). Optimum post and tooth root diameters for a cast post-core system, *Am J Dent* 2009 Oct; 22(5):311-4.

Muammer Koc e Tugrul O" zel (2011) *Micro-Manufacturing: Design and Manufacturing of Micro-Products, First Edition*. © 2011 John Wiley & Sons, Inc. Published 2011 by John Wiley & Sons, Inc.

Periyanan, P.R.; Natarajan, U. e Yang, S.H (2011) A study on the machining parameters optimization of micro-end milling process, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 3, No. 6, 2011, pp 237-246.

Peroz, I.; Blankenstein, F. Lange, K e Naumann, M. (2005). Restoring endodontically treated teeth with post and cores-A review, *Quintessence International*, Volume 36, Number 9, October 2005 pp. 737-746.

Rosen H. Operative procedures on mutilated endodontically treated teeth. *J Prosthet Dent* 1961;11:973-986.

Schwartz, R. S. e Robbins, J. W. (2004). Post Placement and Restoration of Endodontically Treated Teeth: A Literature Review, *Journal of Endodontics*, 30(5), pp.289-301.

Silva CL; Correia A; Fernandes JCS e Pinho A. (2006) Resistência à Fractura de Espigões Falsos Cotos Imediatos. *Rev Port Estomatol Cir Maxilofac* 2006;47:15-23.

Simões Morais, J. (2006) *Desenho Técnico Básico 3*. Porto Editora, LDA; 23º Edição; Pré Impressão e Fotolitos Cipriano Costa; Edição e Execução Gráficos Reunidos, LDA; pp 182-234.

7. Anexos

A1: certificado de qualidade das duas barras de titânio puro com 10mm de diâmetro por 500mm de comprimento.

TiFast		QUALITY CERTIFICATE		2012-001793 /1		17 JUL 2012	
TIFAST S.R.L. Zona industriale San Liberato - 05035 NARNI (TR) ITALY Tel.: +39 0744 7361 Fax: +39 0744 742 260 email: info@tifast.com http://www.tifast.com				CUSTOMER Dept of Mechanical Eng, Univ. of Aveiro Campo Universitario de Santiago 3810-193 Aveiro - Portugal			
HEAT NUMBER A20237		ALLOY Titanium Grade 2 UNS R50400		REFERENCE Complimentary sample			
MATERIAL Bars		SPECIFICATION ASTM F67-06					

CHARACTERISTICS OF THE SUPPLY (NOMINAL)							
Diameter mm		Length mm	Pieces	Net weight Kg	Surface finish	Tolerance	Surface roughness
10.00		500 -	2	0.4	GROUND	h9	Ra < 1.6 µm

HEAT CHEMICAL COMPOSITION							
		O %	H %	N %	C %	Fe %	RES. MAX %
							Each Total
STD limits	min	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	
	max	0.2500	0.0150	0.0300	0.0800	0.30	
A20237	top	0.134	0.004	0.012	0.020	0.095	0.1 0.4 BALANCE
	bottom	0.134	0.004	0.012	0.020	0.100	

MECHANICAL / PHYSICAL PROPERTIES OF THE SUPPLIED PRODUCTS							
IDENTIFICATION	REFERENCE STANDARD	Tensile Strength MPa	Yield Strength 0.2% offset MPa	Reduction of Area %	Elongation %		
A20237-0/V	ASTM E8/E8M - 09, ELONG. ON 4D	min 345 482	min 275 354	min 30 42.6	min 20 25.0		

Heat Treatment **Annealed** Grain Size **# 8 as per ASTM E 112**

US Test: **Billets 100% comp. AMS 2631D CIAA Gr2**

Maximum Camber **<1 mm/m** Eddy current test **No defect, 100% inspected**

Radioactive contamination – free material

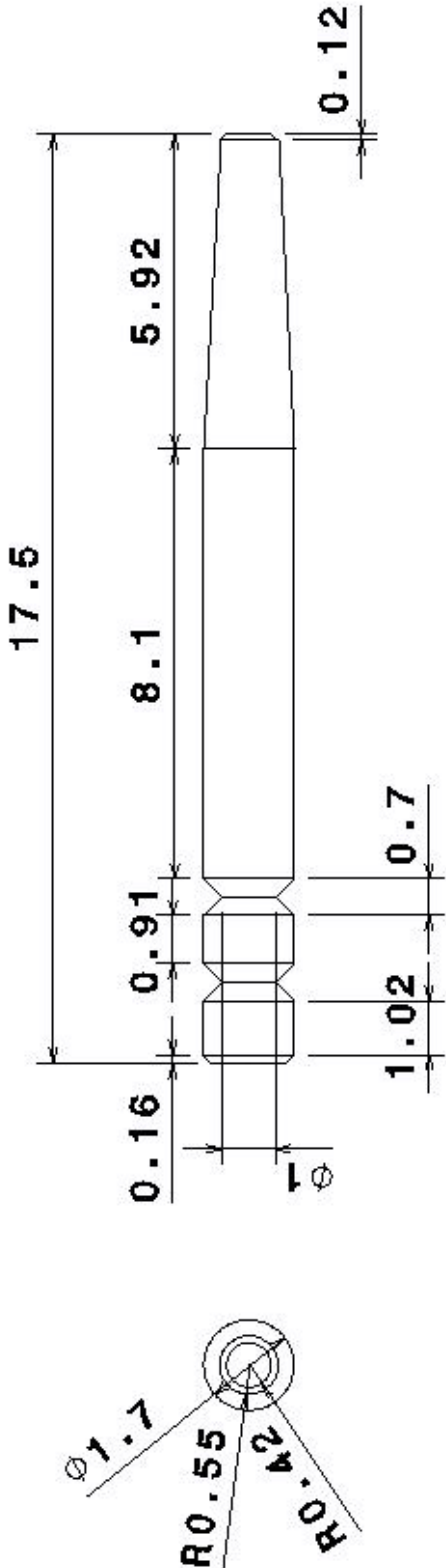
Others

Material melted and manufactured by TiFast (see address on top).

Certified Hydrogen analysis was performed on the supplied product. The first six characters in the IDENTIFICATION give the heat number of the lot.
 The results of the present tests meet the requirements of the applicable specification(s). The present document is in compliance with DIN EN 10204:2005 inspection certificate "Type 3.1"

The Person in Charge for Laboratories ING. S. CAVALLARO 	COMPANY WITH QUALITY MANAGEMENT SYSTEM CERTIFIED BY DNV = EN 9100:2003 =	COMPANY WITH QUALITY MANAGEMENT SYSTEM CERTIFIED BY DNV = ISO 9001:2008 =	Manufacturer's Inspection Representative ING. M. COSTANZI 
--	---	--	--

A2: Desenho técnico do espigão a maquinar.



DRAWING TITLE		Espigão em titânio D1,7X17,5mm		REV	
DRAWN BY		DATE		SIZE	
Tiago Teles		01-02-2013		DRAWING NUMBER	
CHECKED BY		DATE		A4	
DESIGNED BY		DATE		SCALE	
				7:1 WEIGHT(kg)	
				SHEET	
				1 / 1	

A3: Código CNC modelo usado na maquinagem de um espigão de 1,7mm de diâmetro e 17,5mm de comprimento, com P=20µm e a=12,5µm.

G21 G90 G95 G40;	X3,6;
G28 U0 W0;	X3,4;
G92 S3000;	X3,2;
T0707;	X3;
G96 S100 M4;	G0 X5 Z-6,5;
G0 X12 Z1 M8;	X3;
G77 X9 Z-8 F0,1;	G71 U0,02 R1;
X8,5;	G71 P80 Q100 U0,02 W0 F0,00125;
X8;	N80 G0 G42 X1,7 F0,0125;
X7,5;	N90 G1 Z-20,5;
X7;	N100 G0 X5;
X6,5;	G0 X5 Z5;
X6;	G70 P70 Q100;
X5,5;	G0 G40 X11 Z5;
X5;	X2 Z-15,3;
X4,5;	G1 X1,2 F0,005;
X4;	G0 X2;
X3,8;	Z-16,53;
X3,6;	G1 X1,2 F0,005;
X3,4;	G0 X2;
X3,2;	Z-18,5;
X3;	G1 X0,6 F0,005;
G0 X4 Z1 F0,1;	G0 X5;
X3;	Z1;
G71 U0,02 R1;	G28 U0 W0;
G71 P20 Q70 U0,02 W0 F0,00125;	M30;
N20 G0 G42 X-1,5 F0,00125;	
N30 G1 Z-1;	
N40 X1,1;	
N60 X1,898 Z-8;	
N70 G0 X5;	
G0 Z1;	
G70 P20 Q60;	
G0 X12 Z1;	
G28 U0;	
T0707;	
G96 S100 M4;	
G0 X12 Z-7 M8;	
G77 X9 Z-20,5 F0,1;	
X8,5;	
X8;	
X7,5;	
X7;	
X6,5;	
X6;	
X5,5;	
X5;	
X4,5;	
X4;	
X3,8;	

A4: Rugosidades obtidas do espigão comercial (Ø1,7X17,5mm) e dos doze espigões maquinados, os valores das rugosidades estão em µm.

	Espigão de Ø1,7/17,5mm			
	0°	120°	240°	Média
Ra	0,35	0,30	0,37	0,34
RzD	2,40	2,37	2,79	2,52
Rzl	2,72	2,62	2,97	2,77
RmD	3,12	3,48	3,06	3,22
Rt	3,12	3,48	3,10	3,23
Rp	1,18	1,28	1,30	1,25
Rpm	0,88	0,90	1,21	1,00
Rq	0,46	0,40	0,49	0,45
R3z	1,54	1,34	1,28	1,39
Pt	3,28	3,50	3,66	3,48
Pc	152,00	104,00	115,00	123,67
Sm	65,78	96,15	86,95	82,96

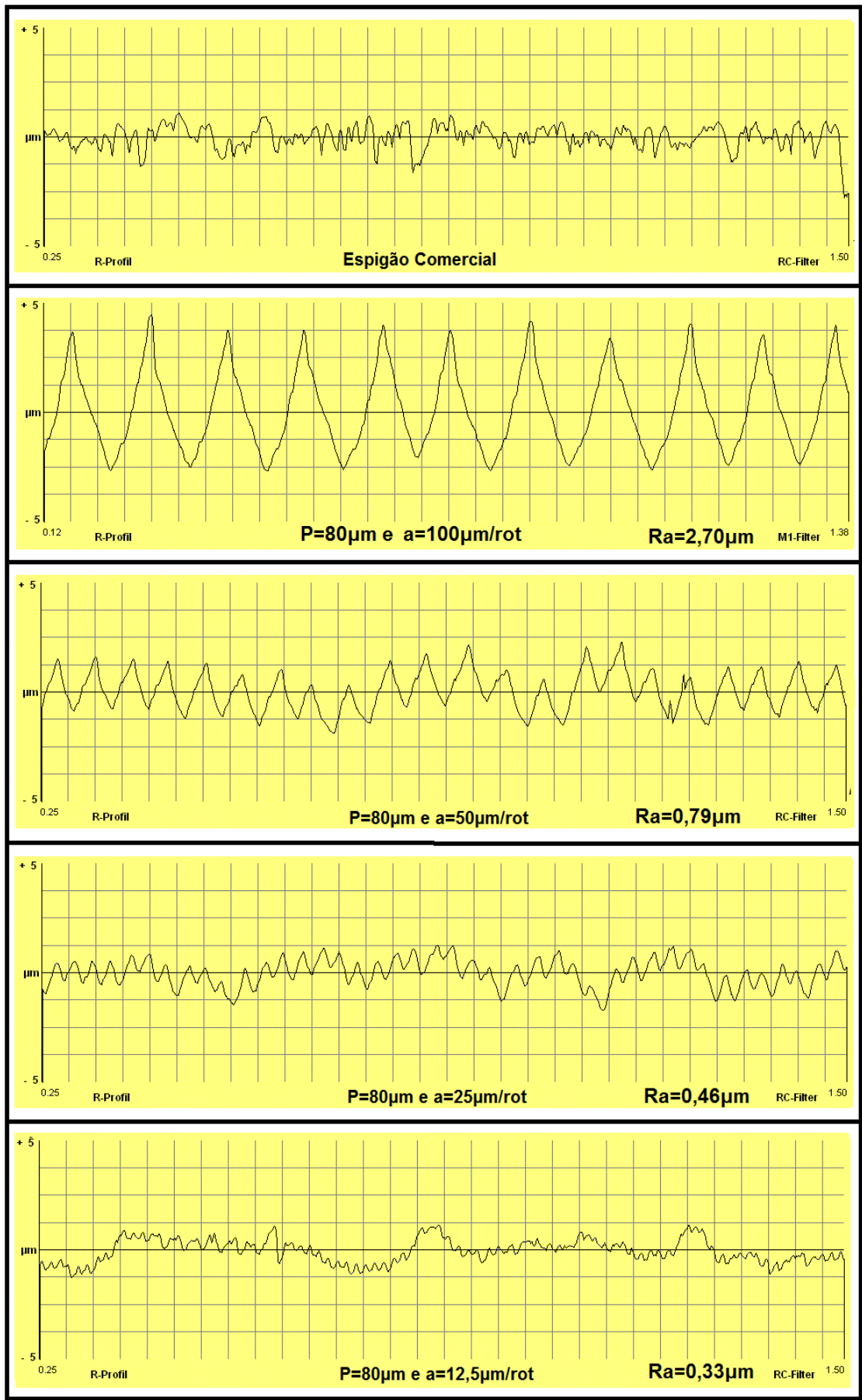
	P=80µm e a=100µm/rot				P=80µm e a=50µm/rot				P=80µm e a=25µm/rot				P=80µm e a=12,5µm/rot			
	0°	120°	240°	Média	0°	120°	240°	Média	0°	120°	240°	Média	0°	120°	240°	Média
Ra	2,72	2,64	2,75	2,70	0,81	0,80	0,76	0,79	0,42	0,36	0,59	0,46	0,38	0,33	0,29	0,33
RzD	9,27	8,90	9,12	9,10	3,77	3,76	3,50	3,68	2,22	1,99	3,20	2,47	1,95	1,76	1,68	1,80
Rzl	9,42	7,95	9,28	8,88	4,10	3,92	3,66	3,89	2,33	2,02	3,25	2,53	2,09	1,90	1,92	1,97
RmD	9,56	9,12	9,50	9,39	4,52	4,40	3,76	4,23	2,42	2,40	3,76	2,86	2,36	2,14	2,42	2,31
Rt	9,72	9,81	9,63	9,72	4,60	4,40	4,12	4,37	2,66	2,40	3,76	2,94	2,41	2,38	2,45	2,41
Rp	5,34	5,72	6,07	5,71	2,20	2,18	2,16	2,18	1,28	1,14	1,70	1,37	0,98	1,08	0,92	0,99
Rpm	5,39	5,60	4,90	5,30	1,91	1,93	1,80	1,88	1,08	0,94	1,54	1,19	0,90	0,96	0,71	0,86
Rq	3,51	3,47	3,12	3,37	0,96	0,96	0,90	0,94	0,52	0,44	0,73	0,48	0,47	0,41	0,37	0,42
R3z	3,03	3,21	3,17	3,14	2,66	2,81	2,60	2,69	1,60	1,40	1,85	1,62	1,32	1,18	1,12	1,21
Pt	10,70	10,38	10,24	10,44	9,50	9,24	8,28	9,01	4,34	3,56	9,00	5,63	7,16	4,88	4,56	5,53
Pc	112,00	128,00	152,00	130,67	152,00	160,00	152,00	154,67	80,00	80,00	88,00	82,67	64,00	40,00	40,00	48,00
Sm	89,28	78,12	65,78	77,73	65,78	62,50	65,78	64,69	125,00	125,00	113,60	121,20	152,20	250,00	250,00	217,40

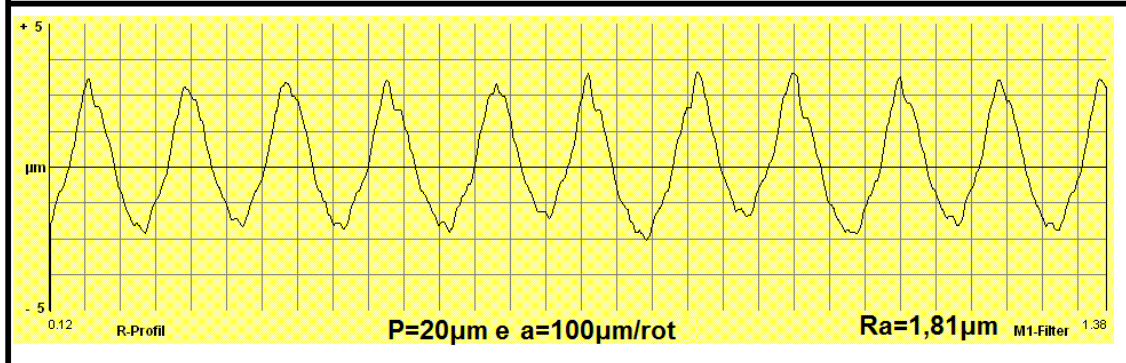
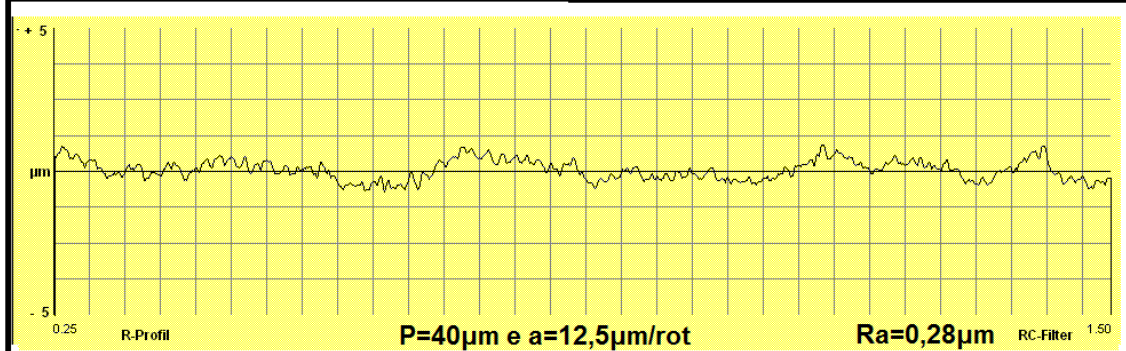
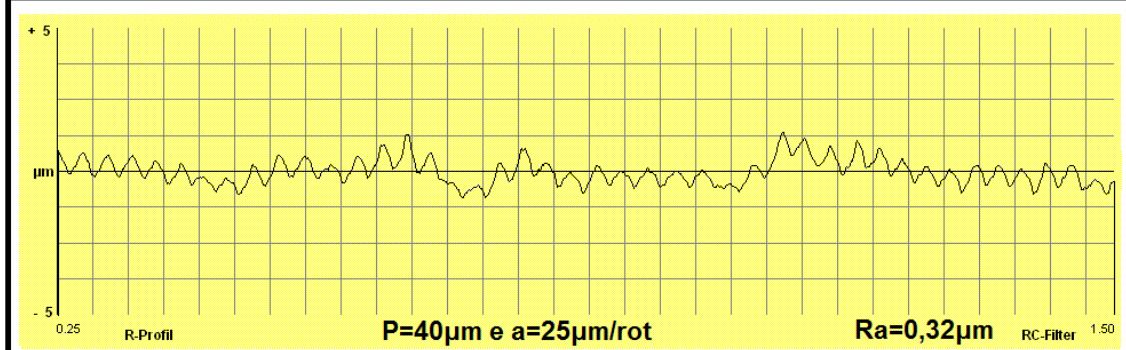
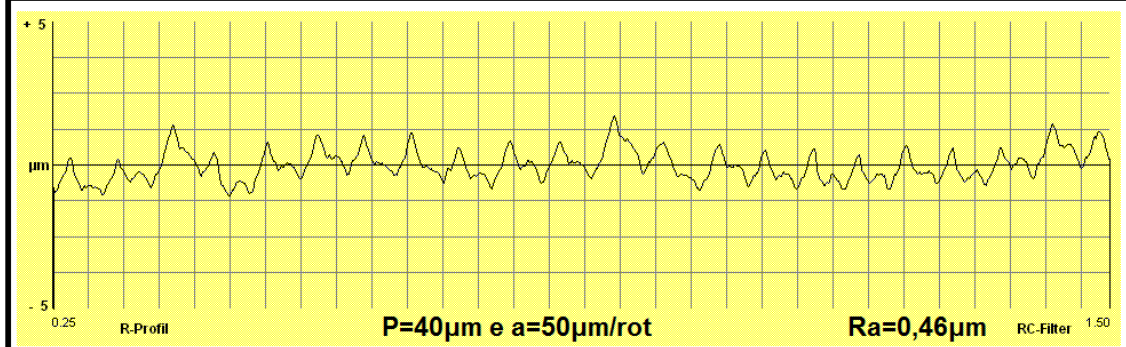
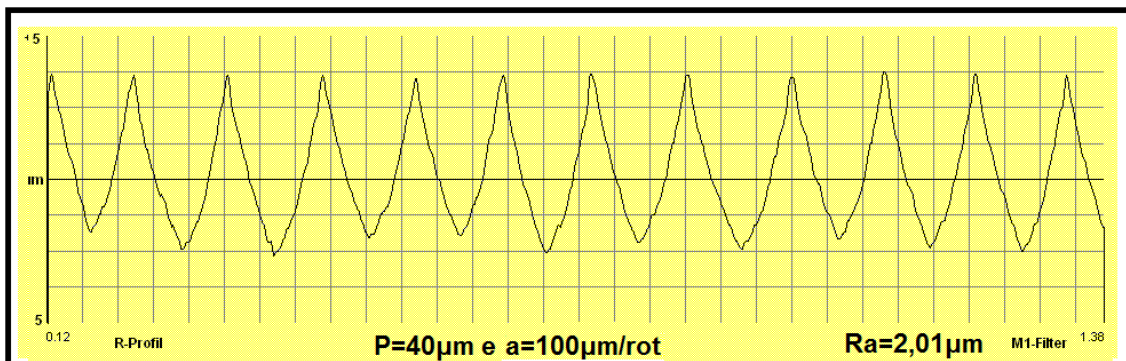
	P=40µm e a=100µm/rot				P=40µm e a=50µm/rot				P=40µm e a=25µm/rot				P=40µm e a=12,5µm/rot			
Ra	2,05	1,96	2,02	2,01	0,42	0,49	0,48	0,46	0,35	0,30	0,30	0,32	0,26	0,31	0,28	0,28
RzD	8,27	7,90	8,12	8,10	2,25	2,67	2,55	2,49	1,84	1,64	1,64	1,71	1,67	1,86	1,56	1,70
RzI	8,42	7,95	8,28	8,22	2,35	2,7	2,55	2,53	2,21	1,83	2,00	2,01	2,33	2,48	2,98	2,60
RmD	8,56	8,12	8,44	8,37	2,66	2,84	2,92	2,81	2,38	2,06	2,30	2,25	2,2	3,74	3,22	3,05
Rt	8,72	8,16	8,58	8,49	2,66	2,9	3,1	2,89	2,38	2,56	2,40	2,45	2,36	2,20	2,25	2,27
Rp	5,12	4,72	4,96	4,93	1,46	1,62	1,68	1,59	1,12	0,98	0,90	1,00	1,62	2,9	2,22	2,25
Rpm	4,84	4,60	4,66	4,70	1,19	1,46	1,4	1,35	0,94	0,80	0,80	0,85	0,95	1,24	0,9	1,03
Rq	2,41	2,27	2,32	2,33	0,51	0,6	0,58	0,56	0,43	0,37	0,37	0,39	0,36	0,5	0,42	0,43
R3z					1,69	1,73	1,72	1,71	1,15	1,06	1,18	1,13	0,96	0,85	0,67	0,83
Pt	10,70	10,38	10,24	10,44	6,7	5,7	4,58	5,66	3,56	4,38	3,70	3,88	9,46	7,4	9,3	8,72
Pc	80,00	88,00	88,00	85,33	144	136	120	133,33	56,00	48,00	64,00	56,00	16	40	24	26,67
Sm	125,00	113,60	113,6	119,30	69,44	73,52	83,33	75,43	178,50	208,30	156,20	181,00	625	250	416,6	437,50
	P=20µm e a=100µm/rot				P=20µm e a=50µm/rot				P=20µm e a=25µm/rot				P=20µm e a=12,5µm/rot			
Ra	1,82	1,85	1,75	1,81	0,39	0,41	0,39	0,40	0,32	0,28	0,24	0,28	0,28	0,22	0,18	0,23
RzD	6,82	6,82	6,20	6,61	2,05	2,01	1,85	1,97	1,86	1,62	1,46	1,65	1,54	1,26	0,92	1,24
RzI	7,17	6,88	6,33	6,79	2,12	2,19	2,28	2,20	2,25	1,80	1,59	1,88	2,04	1,52	1,17	1,58
RmD	7,16	7,16	6,42	6,91	2,56	2,28	2,52	2,45	2,92	2,22	1,78	2,31	2,28	1,44	1,12	1,61
Rt	7,42	7,16	6,50	7,03	2,56	2,56	2,52	2,55	2,20	2,17	1,04	2,14	2,5	1,7	1,32	1,84
Rp	4,20	4,08	3,58	3,95	1,54	1,42	1,34	1,43	1,88	0,90	0,96	1,25	1,12	0,88	0,56	0,85
Rpm	3,84	3,84	3,41	3,70	1,2	1,12	1,01	1,11	1,03	0,76	0,78	0,86	0,76	0,62	0,46	0,61
Rq	2,07	2,10	1,98	2,05	0,48	0,49	0,47	0,48	0,43	0,35	0,30	0,36	0,37	0,28	0,23	0,29
R3z					1,44	1,34	1,28	1,35	1,25	1,08	1,00	1,11	0,9	0,77	0,69	0,79
Pt	9,34	11,20	8,04	9,53	3,86	4,72	3,26	3,95	7,26	4,14	3,42	4,94	3,78	3,24	4,04	3,69
Pc	80,00	88,00	80,00	82,67	120	96	72	96,00	40,00	56,00	40,00	45,33	16	16	16	16,00
Sm	125,00	113,60	125,00	121,20	83,33	104,1	138,8	108,74	250,00	178,50	250,00	226,17	625	625	625	625,00

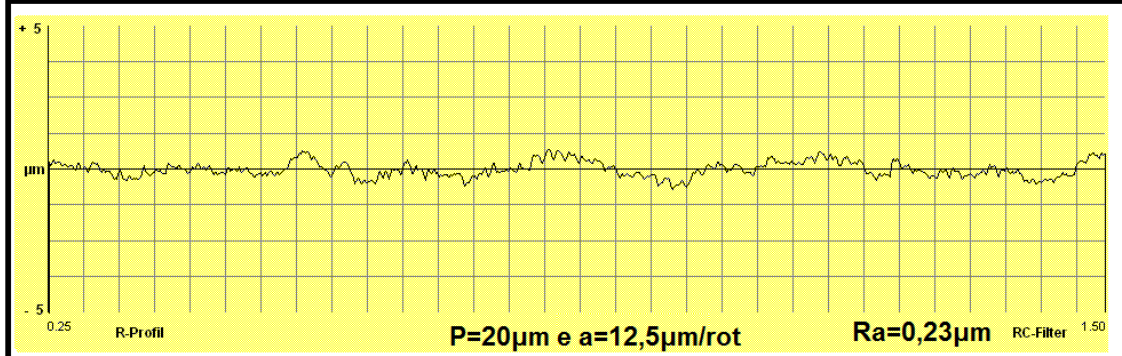
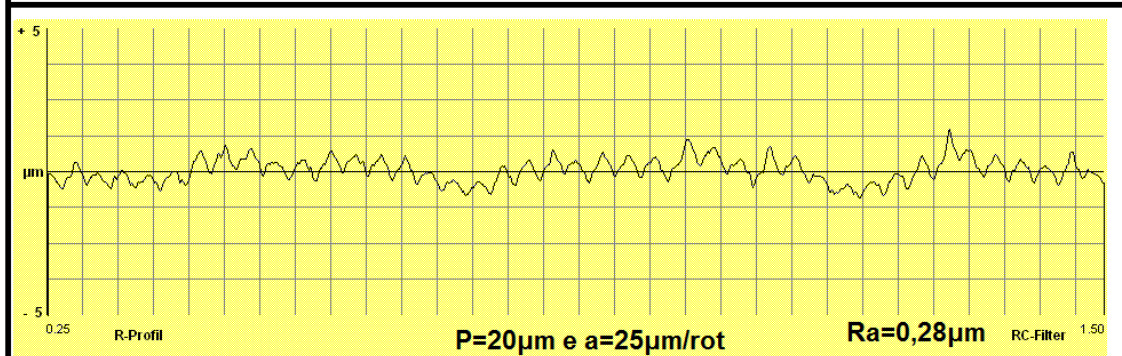
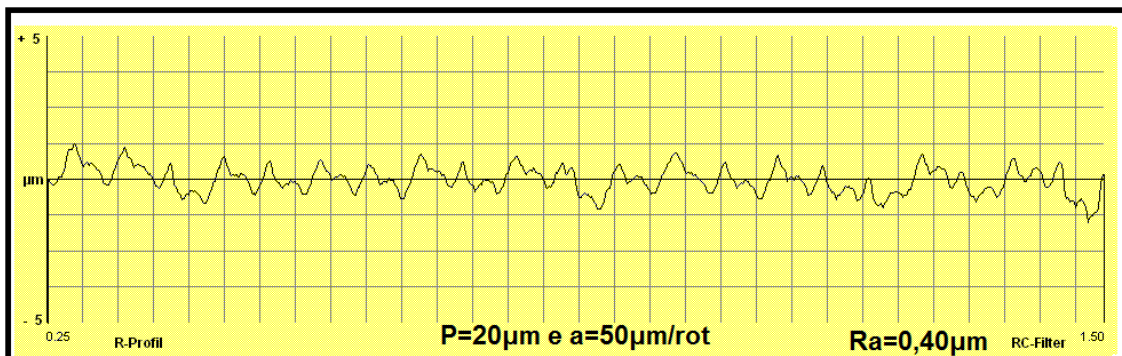
A5: Medidas e ângulos de conicidade dos espigões tendo em conta o avanço e a profundidade de corte.

P [μm]	a [μm/rot]	Medida 1 [mm]	Medida 2 [mm]	Medida 3 [mm]	Δd	β [°]
80	100	1,653	1,911	1,065	0,258	0,638
	50	1,644	1,880	1,076	0,236	0,584
	25	1,632	1,816	1,055	0,184	0,455
	12,5	1,643	1,782	1,058	0,139	0,344
40	100	1,665	1,903	1,056	0,238	0,589
	50	1,625	1,809	1,040	0,184	0,455
	25	1,613	1,754	1,038	0,141	0,349
	12,5	1,608	1,688	0,957	0,080	0,198
20	100	1,650	1,819	0,945	0,169	0,418
	50	1,637	1,746	1,019	0,109	0,270
	25	1,634	1,739	1,014	0,105	0,260
	12,5	1,623	1,661	1,054	0,038	0,094
Espigão original		1,702	1,709	1,062	0,007	0,017

A6: Perfis de rugosidade de todos os espigões maquinados.







A7: Cálculo da taxa de produção

P [cm]	a [cm/rot]	D _{min} [mm]	D _{max} [mm]	D _{médio} [mm]	Vc (cone) [cm/min]	Vc (corpo) [cm/min]	Tp (cone) [cm ³ /min]	Tp (corpo) [cm ³ /min]	$\sum T_p$ [cm ³ /min]
0,008	0,01	1,1	1,7	1,4	1318,8	1601,4	0,105504	0,128112	0,234
	0,005						0,052752	0,064056	0,117
	0,0025						0,026376	0,032028	0,058
	0,00125						0,013188	0,016014	0,029
0,004	0,01						0,052752	0,064056	0,117
	0,005						0,026376	0,032028	0,058
	0,0025						0,013188	0,016014	0,029
	0,00125						0,006594	0,008007	0,015
0,002	0,01						0,026376	0,032028	0,058
	0,005						0,013188	0,016014	0,029
	0,0025						0,006594	0,008007	0,015
	0,00125						0,003297	0,004004	0,007

A8: Cálculo do tempo de corte teórico (Tc):

P [μm]	80	80	80	80	40	40	40	40	20	20	20	20
a [μm/rot]	100	50	25	12,5	100	50	25	12,5	100	50	25	12,5
Tempo de Maquinagem [min]	1,88	3,37	4,45	9,18	3,22	6,30	9,32	17,82	5,45	10,03	17,78	33,45
Comprimento de Passagem Corpo	11,58											
Comprimento de Passagem Cone	5,92											
Diâmetro da Barra	3,00											
Diâmetro do Espigão	1,70											
Diâmetro Mínimo do Cone	1,01											
Diâmetro Médio do Cone	1,36											
Número de Passagens no Corpo	8,13				16,25				32,50			
Número de Passagens no Cone	10,28				20,56				41,13			
Lt Corpo	94,09				188,18				376,35			
Lt Cone	60,87				121,73				243,46			
Lt Somatório	154,95				309,91				619,81			
Tc	0,52	1,03	2,07	4,13	1,03	2,07	4,13	8,26	2,07	4,13	8,26	16,53

9: Cálculo do fator (f) para a escolha do espigão:

Primeiro caso de escolha.

P [μm]	a [μm/rot]	Ra [μm]	Rt [μm]	β [°]	Tempo de Maquinagem [min]	$\frac{Ra}{Ra_{max}}$	$\frac{Rt}{Rt_{max}}$	$\frac{\beta}{\beta_{max}}$	$\frac{T}{T_{max}}$	C1	C2	C3	C4	f
80	100	2,70	9,44	0,638	1,88	1,000	1,000	1,000	0,056	0,20	0,20	0,10	0,5	0,528
	50	0,79	4,37	0,584	3,37	0,293	0,463	0,915	0,101					0,293
	25	0,46	2,94	0,455	4,45	0,170	0,311	0,713	0,133					0,234
	12,5	0,33	2,31	0,344	9,18	0,122	0,245	0,539	0,274					0,265
40	100	2,01	8,49	0,589	3,22	0,744	0,899	0,923	0,096					0,469
	50	0,46	2,89	0,455	6,30	0,170	0,306	0,713	0,188					0,261
	25	0,32	2,25	0,349	9,32	0,119	0,238	0,547	0,279					0,265
	12,5	0,28	3,18	0,198	17,82	0,104	0,337	0,310	0,533					0,386
20	100	1,81	7,03	0,418	5,45	0,670	0,745	0,655	0,163					0,430
	50	0,40	2,55	0,270	10,03	0,148	0,270	0,423	0,300					0,276
	25	0,28	2,34	0,260	17,78	0,104	0,248	0,408	0,532					0,377
	12,5	0,23	1,84	0,094	33,45	0,085	0,195	0,147	1,000					0,571

Segundo caso de escolha.

P [μm]	Va [μm/rot]	Ra [μm]	Rt [μm]	β [°]	Tempo de Maquinagem [min]	$\frac{Ra}{Ra_{max}}$	$\frac{Rt}{Rt_{max}}$	$\frac{\beta}{\beta_{max}}$	$\frac{T}{T_{max}}$	C1	C2	C3	C4	f
80	100	2,70	9,44	0,638	1,88	1,000	1,000	1,000	0,056	0,35	0,35	0,1	0,2	0,811
	50	0,79	4,37	0,584	3,37	0,293	0,463	0,915	0,101					0,376
	25	0,46	2,94	0,455	4,45	0,170	0,311	0,713	0,133					0,267
	12,5	0,33	2,31	0,344	9,18	0,122	0,245	0,539	0,274					0,237
40	100	2,01	8,49	0,589	3,22	0,744	0,899	0,923	0,096					0,687
	50	0,46	2,89	0,455	6,30	0,170	0,306	0,713	0,188					0,276
	25	0,32	2,25	0,349	9,32	0,119	0,238	0,547	0,279					0,235
	12,5	0,28	3,18	0,198	17,82	0,104	0,337	0,310	0,533					0,292
20	100	1,81	7,03	0,418	5,45	0,670	0,745	0,655	0,163					0,593
	50	0,40	2,55	0,27	10,03	0,148	0,270	0,423	0,300					0,249
	25	0,28	2,34	0,26	17,78	0,104	0,248	0,408	0,532					0,270
	12,5	0,23	1,84	0,094	33,45	0,085	0,195	0,147	1,000					0,313

Terceiro caso de escolha.

P [μm]	a [μm/rot]	Ra [μm]	Rt [μm]	β [°]	Tempo de Maquinagem [min]	$\frac{Ra}{Ra_{max}}$	$\frac{Rt}{Rt_{max}}$	$\frac{\beta}{\beta_{max}}$	$\frac{T}{T_{max}}$	C1	C2	C3	C4	f
80	100	2,70	9,44	0	0	1,000	1,000	0	0	0,5	0,5	0	0	1,000
	50	0,79	4,37	0	0	0,293	0,463	0	0					0,378
	25	0,46	2,94	0	0	0,170	0,311	0	0					0,241
	12,5	0,33	2,31	0	0	0,122	0,245	0	0					0,183
40	100	2,01	8,49	0	0	0,744	0,899	0	0					0,822
	50	0,46	2,89	0	0	0,170	0,306	0	0					0,238
	25	0,32	2,25	0	0	0,119	0,238	0	0					0,178
	12,5	0,28	3,18	0	0	0,104	0,337	0	0					0,220
20	100	1,81	7,03	0	0	0,670	0,745	0	0					0,708
	50	0,40	2,55	0	0	0,148	0,270	0	0					0,209
	25	0,28	2,34	0	0	0,104	0,248	0	0					0,176
	12,5	0,23	1,84	0	0	0,085	0,195	0	0					0,140
Espigão Especializado		0,45	3,00	0	0	0,126	0,342	0	0					0,242